国外电子与通信教材系列

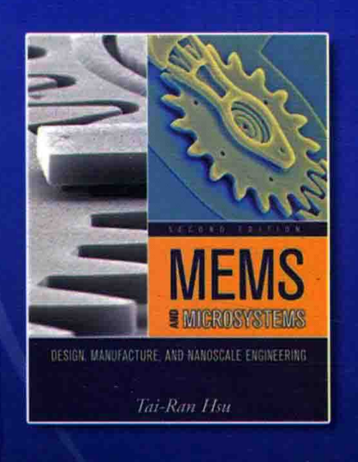
WILEY

MEMS与微系统

——设计、制造及纳尺度工程

（第二版）

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition



［美］ Tai-Ran Hsu（徐泰然） 著

梁仁荣　刘立滨　等译

许　军　审校





MEMS与微系统

——设计、制造及纳尺度工程（第二版）

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition

本书从工程设计的角度讲解微机电系统，是市面上少见的一本同时从电子与机械两个层面介绍该技术的教材。本书第一版面世以来的这几年，以微系统技术与纳米科技为代表的微型化技术发生了翻天覆地的变化。工程师们迫切需要获得这些领域的基础知识与经验，相应的需求与日俱增。因此，作者对本书的第一版进行了细致的修订，并额外增加了全新的一章来介绍纳尺度工程。

本书以纳米技术的简短介绍和历史沿革开篇，依次讲解了包括生产纳米产品的制造技术在内的纳米结构工程设计的基础知识、分子动力学中的工程设计原理，以及纳米尺度物质中的流体流动与热传导。

新版特色

- 更大篇幅地介绍了微加工技术以及组装与封装技术
- 介绍了微陀螺仪、微型麦克风与热管的原理
- 热致动的多层器件与组件的设计方法
- 目前流行的SU-8聚合物材料的使用

本书第二版为读者提供了大量的例题、案例分析以及帮助理解与应用的习题，对专业人士与机械或电子工程专业的学生都具有极高的实用价值。

徐泰然博士是美国加州圣何塞州立大学机械与航天工程系的教授，主要从事微机电系统的设计制造与封装技术的教学和科研工作。由他撰写的本书第一版被公认为是微机电系统领域的畅销教材。



WILEY


ISBN 978-7-121-30499-6

定价：79.00元



策划编辑：冯小贝
责任编辑：周宏敏
责任美编：孙焱津



国外电子与通信教材系列

MEMS与微系统

——设计、制造及纳尺度工程(第二版)

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition

[美] Tai-Ran Hsu(徐泰然) 著

梁仁荣 刘立滨 等译

许 军 审校

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内容简介

本书从工程设计的角度讲解微机电系统，并同时从电子与机械两个层面介绍相关的技术。作者对本书第一版进行了细致的修订，并额外增加了全新的一章来介绍纳尺度工程。本书首先对纳米技术的发展历史做了一个简要的回顾，然后对各种纳米结构在工程设计方面的基本原理做了详细的介绍，包括形成纳米结构的制造技术、基于分子动力学的工程设计原理以及纳尺度材料中的流体流动与热传导特性等。

本书可作为高校微电子、集成电路设计与集成系统等专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书，对于机械工程或电气工程专业的高年级本科生具有非常重要的参考价值，同时可供与集成电路制造技术有关的专业技术人员学习参考。

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition
ISBN:978-0-470-08301-7
Tai-Ran Hsu

版权贸易合同登记号　图字：01-2009-5182

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 与微系统：设计、制造及纳尺度工程：第二版 /(美)徐泰然(Tai-Ran Hsu)著；梁仁荣等译.
北京：电子工业出版社，2017.3
(国外电子与通信教材系列)
书名原文：MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition
ISBN 978-7-121-30499-6

Ⅰ. ①M…　Ⅱ. ①徐…②梁…　Ⅲ. ①微电机-高等学校-教材　Ⅳ. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 287876 号

策划编辑：冯小贝
责任编辑：周宏敏
印　　刷：三河市鑫金马印装有限公司
装　　订：三河市鑫金马印装有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本：787×1092　1/16　印张：24.25　字数：637 千字
版　　次：2017 年 3 月第 1 版(原著第 2 版)
印　　次：2017 年 3 月第 1 次印刷
定　　价：79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：fengxiaobei@ phei.com.cn。

译 者 序

半个多世纪以来，以半导体集成电路为代表的微电子技术所取得的长足发展和巨大成功在众多相关领域都引发了一场轰轰烈烈的微型化革命，可以毫不夸张地说，微型化技术已经成为当前以及今后一段时期内科学技术发展的重要方向之一，而微电子机械系统(MEMS)技术则是利用集成电路芯片的微加工技术，在硅晶圆片上大批量地实现各种集成化的微机械、微结构、微能源、微传感器、微执行器以及信号采集、处理、传输、存储、控制等单元电路，最终形成一个完整的、能够完成特定功能且具有一定智能的微型器件或系统。当前国际上MEMS 技术正在逐步从实验室研究阶段走向实用化应用阶段，未来 MEMS 技术将对工业、农业、国防等领域以及信息、环境、能源、生物工程、医疗、精密仪器、空间科学技术等学科的发展产生重大影响。为了全面提高我国 MEMS 与微系统领域人才培养的质量和教学水平，在电子工业出版社的支持下，我们清华大学微电子学研究所的部分老师和研究生同学共同翻译了美国加州圣何塞州立大学机械与航天工程系徐泰然教授的这本《MEMS 与微系统——设计、制造及纳尺度工程(第二版)》教材。

作为一本介绍 MEMS 工程化设计方法的教材，本书既包含了电气技术方面的相关内容，又涵盖了机械力学方面的相关知识。在该书第一版发行之后的五年里，微型化科学与技术领域又发生了很多巨大的变化，包括微系统技术和纳米技术等。为了满足广大工程技术人员日益增长的获取这些相关领域基本知识和经验的迫切需求，作者对这本畅销教材又做了仔细的修订、补充和更新，包括增加了全新的介绍纳尺度工程的相关章节。此外新修订的第二版教材还具有下述一些特点:(1)将微细加工所涵盖的范围进一步扩展到包含了组装技术和封装技术；(2)增加了关于微陀螺仪、微型麦克风以及热管的介绍；(3)增加了关于热致动多层结构器件单元的设计方法学；(4)补充了关于使用常见的 SU-8 聚合物材料方面的相关内容。无论是对于我国高等院校 MEMS 专业的教学工作而言，还是对于我国 MEMS 产业的广大科技工作者来说，本书都堪称是一本选材得当、内容丰富的重要参考书。

本书由清华大学微电子学研究所的梁仁荣、刘立滨等多位老师及研究生同学共同翻译，全书最后由许军进行统一审校，参与翻译工作的有谭桢、万欣、赵连锋、陈宏雷、郑君、严利人、周卫、王玉东、付军、刘荣华。鉴于译者和审校者的水平所限，译本中的错误及疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

许军

2016 年 11 月于清华园

前　言

自本书第一版出版至今已经过去了5年，在这段时间里我们都目睹了在包括微系统技术和纳米技术在内的有关微型化的科学与技术方面所发生的巨大变化。世界各国的研究机构和工业界已经开发并生产出了多种纳米技术产品，甚至有很多这样的产品已经进入消费市场，其性能也给人们留下了深刻的印象。

为了满足工程师们这种日益增长的获取纳米技术领域相关知识和经验的需求，我们在本书的新版本中增加了一章关于纳米尺度工程的介绍。这一章首先简略地介绍了纳米技术的发展历史和近期的研究进展，接下来概要描述了用于制备诸如量子点、纳米线和纳米管等各种纳米技术产品的相关制造技术。这些纳米技术产品都具有其各自与众不同的特性和应用领域。

新增加的这一章中还介绍了有关纳米尺度物质中的分子动力学、流体流动以及热传输等方面的工程设计原理，这些分析手段给工程师们提供了一个概要性的有关纳米结构工程设计的基础，这一点与第4章和第5章中介绍的有关微米尺度和介观尺度的分析方法是截然不同的。这一章中还讨论了诸如纳米结构的自组装技术——这是纳米结构在实现批量化生产的过程中必须最终解决的一个基本要素——以及纳米技术在社会经济学方面给人类带来的潜在影响等论题。

新版本对于第11章中有关MEMS和微系统的组装、封装与测试技术(APT)也做了大量扩充。20多年来在MEMS和微系统技术产业化领域所取得的各种成功案例都已经清楚地表明APT技术是微系统产品实现批量化生产和高性价比封装的一个主要障碍，需要投入大量的研究与开发工作才能攻克这个前进道路上的拦路虎。这一章既提出了大量与微组装技术相关的重要课题，同时也讨论了使得键合与密封技术能够应用于微米尺度产品的科学基础。为了提高MEMS与微系统产品在结构和性能上的可靠性，在其生产和后期制作过程中的现场测试工作看起来也是一个需要工程师和科学家们进行研究开发的主要领域。

此外，新版本还在第2章中增加了有关微陀螺仪和微热导管方面的介绍，在第4章中增加了有关热致动多层带状结构的设计方法学的内容，在第7章中增加了关于常见的SU-8聚合物材料的应用。

对于国内外那些采用本书第一版作为授课教材的同行们所反馈的大量建设性的意见和建议，我在此表示衷心的感谢。本书第一版被翻译成中文繁体字版和简体字版后也带来了很多教师和读者的宝贵意见。我的同事Ji Wang教授对本书第一版的全文进行了认真的校对，并提出了很有价值的进一步改进建议，对此我也深表谢意。所有这些意见和建议都促使我在这个新版本中对MEMS和微系统这两个新兴的微型化技术给予了更多篇幅的介绍。

由于McGraw-Hill出版公司已经将其图书出版政策调整为专门出版大学高年级以上的教科书，因此我要感谢该公司将本书第一版的版权归还给我，同时我也要感谢英国工程技术研究院(Institution of Engineering and Technology in the United Kingdom)允许我大量使用*MEMS Packaging*(MEMS封装技术)一书中的材料，我在2004年有幸参与了该书的编辑工作。最后我还要对John Wiley & Sons出版公司承诺出版本书第二版表示感谢。

Tai-Ran Hsu

圣何塞，加利福尼亚

2007年4月

第一版前言

在过去的十年里，无论是在发展速度还是在新的应用方面，微系统工程的技术进步都给人们留下了非常深刻的印象。微系统工程涉及微机电系统(MEMS)及其外部相关器件的设计、制造和封装技术。微系统技术在宇航、汽车、生物技术、消费类产品、国防、环境保护和安全、医疗保健、制药以及远程通信产业等方面都有广泛的应用，这一事实使得许多专家能够对微系统及相关产业在2000年取得令人惊异的820亿美元的营业收入给出一个合理的解释。

快速增长的市场对于MEMS和微系统的迫切需求既使人们对这一学科产生了强烈的兴趣，同时也要求工程教育人员在他们各自的机构内部提供有关这个学科的课程。很多在职的工程师也表现出了类似的兴趣，他们同样希望在有关微系统的设计和制造方面获得必要的知识和经验。但是由于微系统工程是一个无论在科学还是在工程方面均涉及较宽领域的学科，而目前在这方面尚缺少能够全面介绍相关知识的综合性书籍，因此这些在职工程师们要实现他们的理想和目标还面临着较大的困难。由此可见，目前急需一本能够向读者提供有关微系统技术方面的综合性知识以及有关各类微系统产品设计、制造和封装方法学的书籍，正是这样一种需求激发我完成了这本教材的写作。

本书的写作目的是给机械、电机、制造以及相关工程学科的大学高年级本科生和刚入学的研究生提供有关微系统设计、制造与封装技术方面必要的基础知识和经验。学习的重点放在将学生前几年已经获得的各种知识和经验应用于微系统的设计和制造方面。书中相关论题的编排和组织方法以及其中给出的大量设计实例同样也会引导在职的工程师们进入到微系统工程的研究领域。

无论是作为大学本科生还是研究生级别的教材，本书都是准备作为一个15周的学期来使用的。学生应该具备大学数学、物理和化学以及基本的材料科学、电子学和机械设计等工程学科的预备知识。

本书包含以下11章：

第1章首先介绍微系统的概述和微加工技术的发展，由此引出微系统的生产，最后预测了不同类型微系统产品当前的以及潜在的市场情况。

第2章列举了目前已有的各类微系统中的微传感器、微致动器与微马达、微型阀、微型泵以及微流体控制技术的工作原理。

第3章给出了适用于微系统设计和加工制造的相关工程科学论题的概述。

第4章包括与微系统设计和封装技术相关的工程力学知识。这一章讨论的课题包括可变形的固体力学和机械振动理论，此外还包括微结构中常见的薄膜之间界面的热力学和断裂力学的基本方程。本章最后概要介绍了用于应力分析的有限元方法。

第5章讨论了热流体工程原理在微系统设计中的应用。首先概要介绍了流体力学理论和微流体流动的毛细管效应，接着介绍了各种气体在亚微米和纳米尺度的稀疏效应，最后给出了在亚微米尺度的系统中有关热传导特性的修正方程。

第 6 章论述了广泛应用于微器件与微系统理论设计工作中的等比例定律。学生们将会认识到通过等比例缩小微系统中某些相关的物理量，可能会给器件性能带来正面的影响，也可能会带来负面的影响。

第 7 章讨论了微型元器件中常用的各类材料，介绍了各种有源衬底和无源衬底以及封装材料。对微系统中用到的其他材料，例如压阻、压电和聚合物材料，也进行了描述。

第 8 章给出了有关微制造技术中的各类微加工工艺的概要介绍。

第 9 章涵盖了 3 种常用的微制造技术，即体微制造技术、表面微加工技术和 LIGA 工艺。

第 10 章和第 11 章介绍了与微系统设计和封装技术相关的一些基本要素，给出了 CAD 工具和有限元分析方法在上述工作中的应用。精选出的几个有关微压力传感器和微流体技术的设计与封装案例研究及例题展示了这些方法在产品设计和封装中的应用。

要在一个 15 周的学期里通过每星期讲授 3 小时的课程来覆盖本书中多种不同类型的论题，这对授课教师来说是一个很严峻的挑战。有鉴于此，在接下来的部分中给出了一个“给教师的建议”，这是基于我个人在给两类不同水平的学生讲授这门课程的经验总结出来的，在这个建议中同时也给出了按 15 周或 10 周的学期来教授 MEMS 或微系统课程的授课选题建议。

要依靠一个人的能力来完成这么大篇幅的一本书的准备工作几乎是不可能的。我很荣幸能够有机会与像擅长于纳米流体动力学研究的 Ali Beskok 教授以及专攻微流体毛细管电泳设计和建模工作的 Krishnamoorthy 博士这样的专家学者进行交流沟通。能够拥有像 Ta-jen Tai、Valerie Barker、Mathew Smith、Jeanette Wood、Jacob Griego 和 Yen-chang Hu 这样一些既具有专业能力又具有献身精神的学生，我也感到非常欣慰，正是他们在我为本书所设计的大量例题中补充了许多详细的计算过程并仔细检查了各个数据的精度。我还要感谢 Mindy Kwan 帮助我实现了本书中大量照片和插图的数字化工作。同时也要感谢国内外 MEMS 产业界的众多公司提供了本书中所收录的很多重要照片和插图。这本书的完成也是 1995—1998 年我领衔负责的一门本科生机械电子学课程开发项目的一部分。最后非常感谢美国国家科学基金会（NSF）本科生教育部门对该项目的资助。

我还要感谢下面所列的各位评审人的不知疲倦的努力，他们在使得这本书尽可能全面和明晰方面，做出了很多超出其职责范围的工作。

Norman Tien，康奈尔大学

Robert S. Keynton，路易斯维尔大学

Imin Kao，纽约州立大学石溪分校

Dennis Polla，明尼苏达大学

Zeynep Celik-Butler，南卫理公会大学

Ashok Srivastava，路易斯安那州立大学

Ryszard Pryputniewicz，伍斯特理工学院

Michael Y. Wang，马里兰大学

Michael Histand，科罗拉多州立大学

Liwei Lin，加州大学伯克利分校

Masood Tabib-Azar，凯斯西储大学

George F. Watson，技术编辑

我还要特别感谢新加坡 Ngee Ann 理工大学的 Cheah Choo Lek，他对本书手稿进行了非常认真的阅读和深入细致的思考，并提出了很多改进的建议。最后，还要感谢 McGraw-Hill 出版公司的编辑部及其全体职员提供的出色服务，我也非常感谢 Jonathan 工厂的支持和有效的帮助。

Tai-Ran Hsu

圣何塞，加利福尼亚

给教师的建议

这本书是为大学高年级本科生和刚入学的一年级研究生编写的教材，它也可以用作参考书，以引导在职的工程师们进入微系统与纳米尺度工程这样一个不断增长的领域。本书的内容是为15周的学期课程而设计的，它可以同时适合大学本科生和研究生的教学水平。在舍弃了相当多的材料之后，本书也可以用于10周的课程教学。

这本教材将对具有下述学术背景和经验的学生的教学工作特别有效：

1. 较好地掌握了大学数学、物理和化学知识的大学高年级本科生。
2. 已经先修过基本的电机与电子工程、材料科学、工程力学和机械设计等课程或具有相当知识的学生。
3. 有过使用 MathCAD 和 MATLAB 等数学类软件经验的学生。

要在一个15周或10周的学期内通过每周讲授3小时来完成这样一门含有众多不同论题的 MEMS 与纳米技术入门课程的授课任务，这对教师来说是一个严峻的挑战。何况在同一个班级中，很可能不同学生之间的学术背景和经验的差异也非常大，这就会使上述问题变得更加复杂。下面的教学日程表 A 和教学日程表 B 分别给教师在不同学期长度的授课工作提供了授课主题选择方面的建议。授课教师也可以根据自己的判断将下述教学日程表中未列出的章节指定为省略的教学内容或学生的课外阅读材料。

对应于15周的学期的教学日程表 A

周数	本科生班级	研究生班级
1	第2章	第2章
2	3.3节、3.5节、3.6节、3.7节、3.8节	3.3节、3.5节、3.6节、3.7节、3.8节
3	4.1节、4.2节、4.3节	4.1节、4.2节、4.3节、4.4节
4	4.4节、4.6节、4.7节、5.1节	第4章剩余部分及5.1节、5.2节
5	5.6节、5.7节、5.8节	第5章剩余部分
6	第6章	第6章及7.1节~7.3节
7	7.1节~7.5节	7.4节~7.11节
8	7.6节~7.11节	8.1节~8.5节
9	8.1节~8.5节	8.6节~8.10节
10	8.6节~8.10节	第9章及10.1节、10.2节
11	第9章	第10章剩余部分
12	10.2节、10.3节、10.4节、10.7节、10.8节	11.1节~11.8节
13	11.1节~11.8节	11.9节~11.19节
14	11.9节~11.19节	12.1节~12.8节
15	12.1节~12.6节及12.9节~12.12节	第12章剩余部分

对应于10周的学期的教学日程表B

周数	本科生班级	研究生班级
1	2.2节~2.6节	
2	3.5节~3.7节及4.2.3节、4.4.3节	3.5节~3.7节，4.2.3节、4.4.3节及5.1节、5.4节~5.9节
3	5.4节、5.6节及5.7节	第6章
4	7.1节~7.9节	第7章
5	7.10节、7.11节及8.1节~8.3节	8.1节~8.5节
6	8.4节~8.10节	8.6节~8.10节及9.1节、9.2节
7	第9章	9.3节、9.4节及10.1节~10.4节
8	10.2节、10.4节、10.5.2节、10.7节、10.8节	10.2节、10.3节、10.4节、10.5.2节、10.7节、10.8节
9	11.2节~11.9节、11.11节~11.14节、11.16节、11.21节	11.2节~11.9节、11.11节~11.14节、11.16节、11.21节
10	12.2节~12.5节、12.11节、12.12节	第12章

任课教师们当然也可以根据自己的判断来选择授课的主题，而不一定非要局限于上述教学日程表中建议的情况，这样可能会更适合他们自己特定的偏好和教学安排。

作者鼓励教师使用黑板来讲解教材中提供的例题，而不是简单地使用图片或投影幻灯片来向学生快速地展示这些例题。对于学生深入学习并掌握诸如某些特定的微加工工艺等主题的知识来说，通过精心选题的设计项目而获得的经验也是非常宝贵的。这些设计项目可以分配给包含两个或三个学生的小组来完成。必须给这些设计项目计入适当的分数，例如可以计入整个课程成绩的20%。为了完成全班所有学生设计项目的互评，还可以专门为这些设计项目的陈述报告保留一个额外的时间段或者安排一个“项目日”。这些陈述报告会使班里所有的学生都从中受益，因为他们可以通过各自的陈述报告以及随后的积极讨论和提问彼此之间相互学习。授课教师也可以不断收集这些设计项目产生的新想法和结果，作为他们未来授课材料的补充内容。

目　　录

第1章　MEMS与微系统概述

1.1　MEMS与微系统

MEMS这个单词是microelectromechanical system(微电子机械系统)的缩写。一个MEMS通常包含一些尺寸介于1微米(μm)到1毫米(mm)之间的元件(1毫米=1000微米)。构造一个MEMS是为了获得一个特定的工程功能，或通过电子机械或电化学方法实现一些特定的功能。

MEMS中的核心单元一般包含两类主要的元件：一类是传感和/或致动元件，另一类是信号转换单元。图1.1以图示方式说明了在一个微传感器中这两类元件的功能关系。

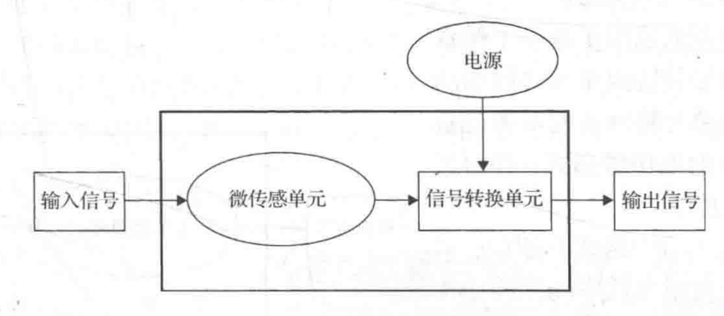


图1.1　MEMS微传感器

制作微传感器是为了用来感知某些特定的物理、化学或生物信号的存在及其强度，例如温度、压力、力、声、光、核辐射、磁通量以及化学和生物学组分等。微传感器的优点是可以灵敏、精确地测量出最小样品量的物质，另外它们也可以被大批量地制造出来。

人们已经为各种不同的应用领域研制出了各种不同类型的微传感器，这些微传感器也被广泛应用在工业界。常见的传感器包括生物传感器、化学传感器、光学传感器、热以及压力传感器等。这些传感器的工作原理将在第2章中介绍。在压力传感器中，输入信号，例如压力源产生的压力，被一个微型的敏感元件感知。这个敏感元件可能仅仅是一个厚度为几微米的硅薄膜，如图1.22(c)和图2.8所示。薄膜受外力产生的形变被植入在薄膜中的微压敏电阻转换成电阻值的变化。这些压敏电阻构成了转换单元的一部分。由感知的最大应力变化引起的压敏电阻器的阻值变化，可以通过微型惠斯通电桥电路进一步将其转换成相应的电压变化，这种微型惠斯通电桥电路也作为转换单元的一部分附着在敏感元件上(见图2.9)。因此这种类型微传感器的输出信号是对应于输入压力的电压变化。典型的微压力传感器的封装产品如图1.2所示。

还有很多其他类型的微传感器也已经进入市场或正处在研发之中，它们包括各种化学传感器，这主要是为了进行空气质量控制而用于检测燃烧过程中或制造工艺中排放出来的或来自环境中的一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、一氧化氮(NO)、臭氧(O_3)和氨气(NH_3)等化学物质或有毒气体。

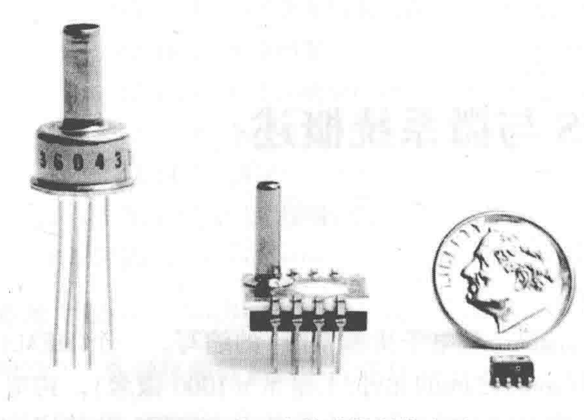


图1.2　微压力传感器封装产品

在最近几年里，生物医学传感器和生物传感器已经在微传感器的市场中占据了相当大的份额。微型生物医学传感器主要用于诊断分析。相比于传统的生物医学仪器来说，这些微型传感器由于尺寸很小，因此它们通常只需要很少量的检验样品，就可以非常快地得出检查结果。而且，这些微型传感器可以批量化生产，因此其单位制造成本非常低。此外，这些微型传感器大多数都是一次性使用的，可以避免重复使用过程中的清洗以及必要的处置等手工劳动，这也同样可以节约大量成本。生物传感器则被广泛地应用在分析化学和生物医学以及基因工程中。

对于这些微型传感器，我们将在2.2节中给出其中多数的工作原理。第4章和第5章则要介绍这些传感器的设计方法。

图1.3以图示方式说明了在一个微致动器中传感元件和信号转换单元之间的功能关系。信号转换单元将输入的电源能量转换成换能器所需的电压等形式，并由其完成致动元件的功能。

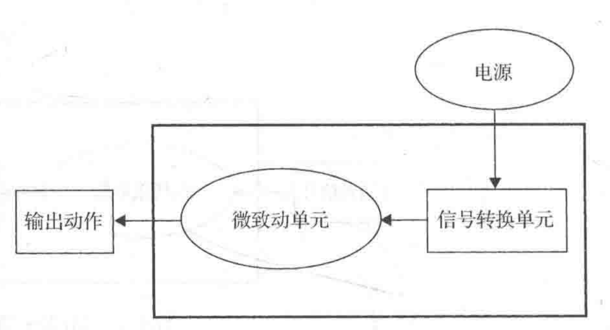


图1.3　MEMS微致动器

正如我们在2.3节中将要介绍的，有很多种方法可以让微型器件中的元件结构动起来。一种很常用的致动方法是利用静电力，它是在被空气等绝缘材料隔离开的平行导电金属板或电极之间施加电荷而产生的，这非常类似于电容器中的情况。由一个直流电源施加到平行板(即电容器中的电极)上的输入电压可以产生静电力，它能够引起相互对准的平行板沿垂直方向相对运动，也能够引起相互错开的平行板沿平行的方向移动。这些移动就可以被用来完成所需的动作。静电致动已经被应用在许多微致动器中，其中的一个应用就是如图1.4所示的微夹钳。我们在第2章中还将介绍几种其他类型的致动方法以及它们在其他类型器件中的应用。

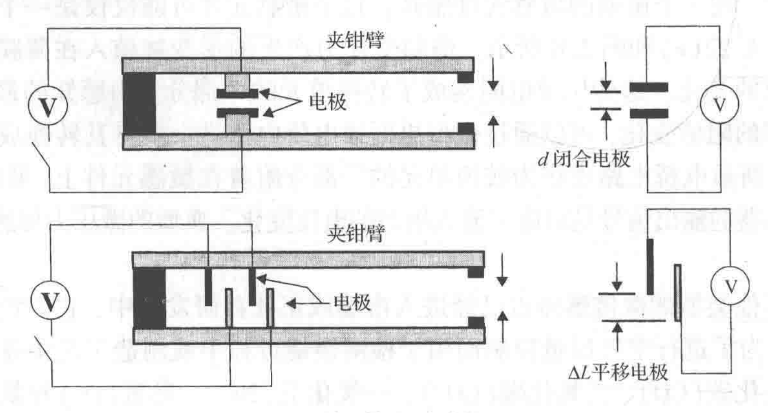


图1.4　利用静电致动的MEMS

微系统通常是一个包含 MEMS 元件的小型化工程系统，它一般都是针对完成特定的工程功能任务而设计的。尽管很多 MEMS 元件事实上可以制作成只有微米量级的尺寸，但是典型的微系统还是处于"介观尺度"的(关于介观尺度并没有一个十分清晰的定义，它的含义是指介于微观和宏观之间的尺度。按照惯例，一般认为介观尺度是介于毫米与厘米之间的尺寸)。按照略微严格一点的观点，[Madou，1997]定义一个微系统应包含 3 类主要元件：微传感器、致动器和处理单元。这 3 类元件之间的功能关系如图 1.5 所示。

图 1.5 以图示方式说明在一个微系统中某个或某些传感器所感知的信号必须被信号转换与处理单元转换成可以为致动器所接受的形式。其中汽车里的气囊展开系统就是这种操作过程的一个实例，汽车在剧烈的碰撞中所产生的冲击被微型惯性传感器"感知"，这个微型惯性传感器就是按照微加速度计的原理制造出来的，其设计原理将在第 2 章中介绍，传感器产生一个合适的信号给致动器，将气囊打开，从而保护驾驶员和乘客免受严重伤害。

图 1.6 展示了为实现上述目的而生产的微型惯性传感器。该传感器安装在汽车的底盘上，它里面包含两个微加速度计，其中左侧的加速度计用来测量水平(x)方向的制动，而右侧的加速度计则用来测量垂直方向(y)的制动。这两个加速度计和信号转换与处理单元都被集成制造在同一块集成电路(IC)芯片里。整个芯片的尺寸大约为 3 mm×2 mm，微加速度计只占了整个芯片面积的 10% 左右。这种类型的微加速度计的工作原理将在 2.5 节中介绍。

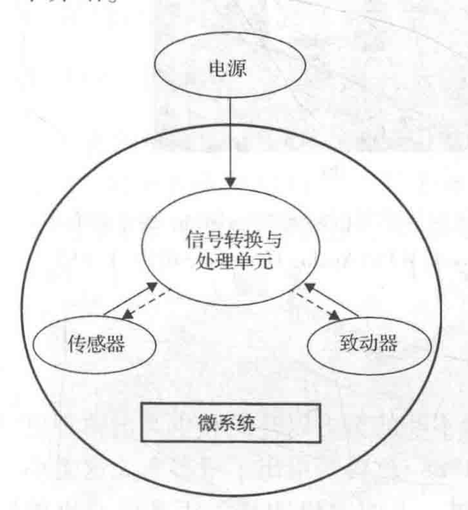


图 1.5　一个微系统所包含的基本元件

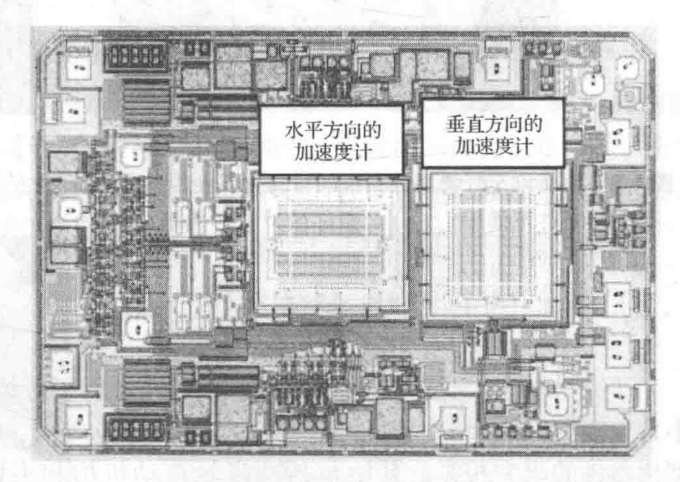


图 1.6　Analog Devices 公司的 ADXL276/ADXL250 微加速度计
(经位于Norwood，MA的Analog Devices公司许可使用)

正如本节中所介绍的那样，大多数微系统都是为了完成某一特定的功能而被设计及制造出来的。但是工业界目前有一个明显的趋势，就是要将信号处理以及闭环反馈控制系统集成到微系统内部，使得整个集成系统变得智能化。图 1.7 展示了这样的可能性。

还有很多微系统是建立在"片上实验室"(lab-on-a-chip)这个概念上的。这样的一个完整的单元可以包含在一个尺寸小于 0.5 mm×0.5 mm 的硅芯片上。图 1.8 以汽车气囊展开系统中所使用的两种不同的微加速度计或惯性传感器的设计为例说明了这一问题。

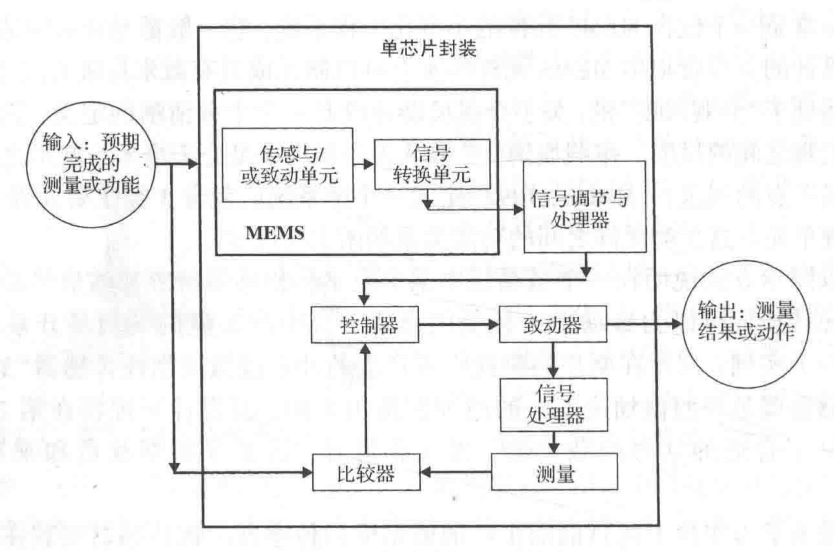
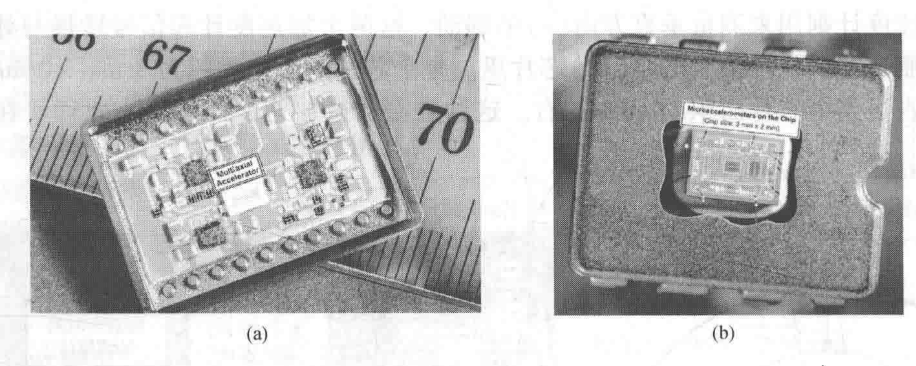


图 1.7　智能化的微系统



(a)　(b)

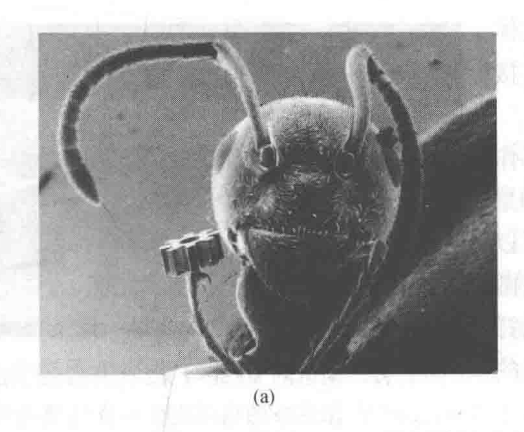
图 1.8　用于汽车气囊展开系统的智能化惯性传感器：(a)片上惯性传感器(经德国 Karlsruhe 核子研究中心许可使用)；(b)封装好的片上传感器(经位于Norwwood，MA的Analog Devices公司许可使用)

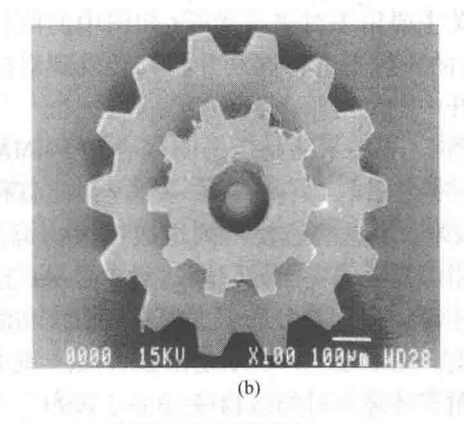
1.2　典型的 MEMS 与微系统产品

研究机构和工业界在过去的 20 年里已经进行了持续不断的努力以开发和生产出体积更小且性能更好的 MEMS 器件和组件。[Mehregany 等人，1988]就曾经给出了很多有关这类小型化器件的研究报告，其中包括硅齿轮传动机构和夹钳。下面给出的是近年来研制出的 MEMS 器件和组件的一个清单，其中包含一些简单的介绍，当然，这个清单会随着微制造技术的不断发展而变得越来越长。

1.2.1　微齿轮

图 1.9(a)展示的是一个尺寸比蚂蚁头还要小得多的齿轮，而图 1.9(b)展示的则是一个采用陶瓷制造出的双层齿轮，齿轮的齿距均在 100 微米的量级。这两种齿轮都是利用 LIGA (LIGA是德文单词 Lithographie Galvanoformung Abformung 的缩写)工艺制造出来的，我们将在第 9 章中详细介绍 LIGA 工艺。


(a)



(b)

图 1.9　采用 LIGA 工艺制作的微齿轮：(a)位于蚂蚁腿末端的微齿轮；(b)双层陶瓷齿轮(经德国Karlsruhe核子研究中心许可使用)

1.2.2　微马达

图 1.10 展示的是一个采用 LIGA 工艺制作的静电驱动的微马达[Bley, 1993]。该马达中所有的 3 个部件——转子(即中心齿轮)、定子以及扭矩传送齿轮——都是用镍制作的。锯齿状转子的直径为 700 微米，它与另一个直径为 250 微米的齿轮啮合，后者将该马达产生的扭矩传送出来。转子与转轴之间的间隙以及转子与定子之间的间隙都是 4 微米，整个装置的高度为 120 微米。

1.2.3　微涡轮

微涡轮也是用来提供动力的[Bley, 1993]。如图 1.11 所示，该涡轮是采用镍材料制造的，其转子直径为 130 微米，转子和转轴之间的间隙为 5 微米，涡轮的高度为 150 微米，整个装置都是采用镍材料制造的。该涡轮的最大转速可达 150 000 转/分钟，其寿命可达 1 亿转。

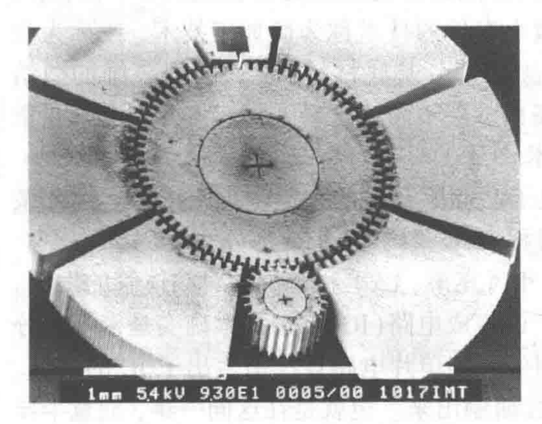


图 1.10　采用 LIGA 工艺制作的微马达(经[Bley, 1993]许可使用)

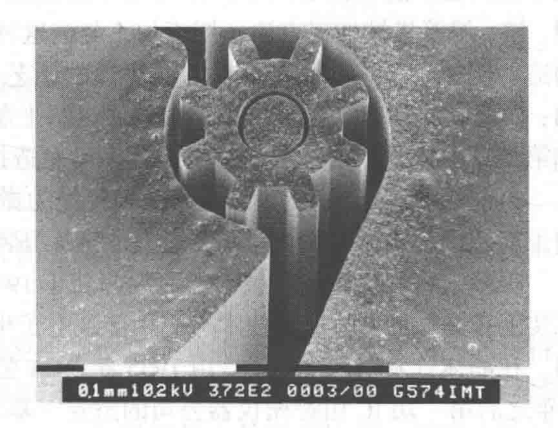


图 1.11　微涡轮(经[Bley, 1993]许可使用)

1.2.4　微光学元件

这些元件已经被广泛应用在通信产业的高速信号传输中。在此我们将在图 1.12 和图 1.13 中展示两个这样的微光学元件。图 1.12 是一个利用硅基制造工艺制作的微型光开关，这种

光开关主要用于对来自光纤(如图中的圆柱状体所示)的入射光进行调制并将其转发到对应的接收光纤中。

图 1.13 展示的是用透明聚合物 PMMA 制作的微透镜，图 1.13(a)中每一个透镜的直径都是 150 微米，由这些透镜阵列组成的微物镜，可以使医用内窥镜的光学分辨率达到 3 微米。这些微透镜还可以应用在复印机、激光扫描仪和激光打印机上。图 1.13(b)所示是由这种微透镜组成的一个用于神经外科的微物镜[Bley, 1999]。

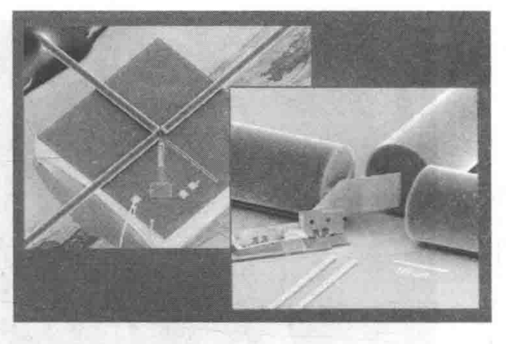
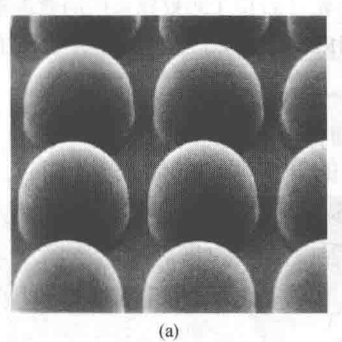
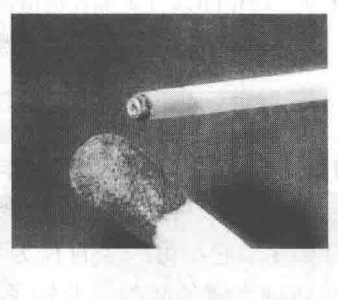


图 1.12 朗讯的 MEMS 1×2 光开关(经朗讯科技的贝尔实验室许可使用)



(a)



(b)

图 1.13 大孔径的微透镜阵列(经[Bley, 1999]许可使用)

1.3 微加工技术的发展

微系统中的元件尺寸一直在持续不断地缩小，甚至某些 MEMS 组件的尺寸已经进入了亚微米的尺度。这种微小尺寸器件与组件的加工制造显然已经完全超越了传统的车、钻、磨、锻、铸、焊等机械加工方法。用于加工制造这种微小组件的技术称为微加工技术，或称为微制造。例如，可以采用物理或化学腐蚀的工艺来去除部分基底材料，从而获得三维的微结构；而薄膜淀积技术则可以用来在基底材料上制备出多层不同的材料。我们将分别在第 8 章和第 9 章中详细介绍这些微加工工艺和微制造技术。

目前的微制造工艺包括过去 50 多年里为微电子产业所开发的大量微加工工艺。因此微加工工艺已成为微系统设计、制造、封装及组装过程中的一个重要组成部分。

很多人将现代微加工技术的起源归功于 1947 年肖克莱、巴丁和布拉顿对晶体管的发明。事实上正是如此，微加工技术与应用于微电子生产的集成电路(IC)制造技术确实是密不可分的。在晶体管发明出来之后，由 1955 年 RCA 公司生产的单片电路首次衍生出了 IC 的概念。3 年之后第一块 IC 由德州仪器公司的杰克·基尔比研制出来。也就是在这同一年，仙童半导体公司的罗伯特·诺伊斯研制出了第一块平面型的硅基 IC。今天，下一代的集成电路，也就是所谓的特大规模集成电路(ULSI)，已经能够在一个典型的比手指甲还要小的芯片面积上包含 1000 万个晶体管和电容器。

尽管微制造过程中的某些关键工艺已经存在很长时间了，但是微制造这个词直到 1982 年才首次出现在公开的出版物中。举例来说，硅的各向同性腐蚀这一关键制造工艺早在 1960 年就已经开始使用了，而改进后的各向异性腐蚀工艺则发明于 1967 年。

1.4　微系统与微电子学

众所周知，微电子学是 20 世纪出现的最有影响力的技术之一。如果没有微电子技术的成熟，则近年来 MEMS 产业的繁荣也是不可能的事情。事实上也正是如此，目前 MEMS 产业里的很多工程师和科学家也都是微电子领域的专家，就像这两个行业共享了很多通用的制造工艺一样。然而，过分强调这两类技术的相似性不仅不准确，而且还可能会严重地阻碍微系统技术发展的步伐。我们将会看到，无论是在设计、封装还是在组装技术上，微系统都与集成电路及微电子学有着相当大的差别。因此对于该领域的工程师来说，必须充分认识到这些差别并有针对性地开发出一些必要的方法和工艺技术。表 1.1 总结了这两个技术领域的相似性和不同点。

表 1.1　微系统与微电子学的对比

微系统与 MEMS（硅基）	集成电路
复杂的三维结构	主要是二维结构
封装的产品中可能会涉及活动的部件、光束的通路以及密封的流体和化学药品	产品一旦封装之后即成为固定结构
可完成各种不同的生物、化学、电子机械及光学功能	通过传导电流实现特定的电学功能
敏感部件要求与工作介质相接触	必须保护敏感的芯片不受外界因素的影响
使用单晶硅芯片、硅的化合物、陶瓷以及其他材料，例如石英、聚合物和金属	使用单晶硅芯片、硅的化合物、陶瓷和塑料
需要封装和组装多个部件	只需封装和组装个别部件
缺少工程设计方法和标准	已有成熟的设计方法
在衬底上只有一些简单的图形，但是要求与复杂的电路集成在一起，以实现信号转换	在衬底上具有复杂图形构成的高密度电路
在设计、材料选取、制造工艺以及封装和组装过程中，都没有现成的工业标准可遵循	已有各种相关的工业标准
大多数产品都是根据客户的需求进行小批量生产的	大批量生产
可使用的制造技术包括体微加工技术、表面微制造技术以及 LIGA 工艺	制造技术已得到验证，技术文档齐全
封装和组装技术尚处在初始的发展阶段	已经建立了完整的封装和组装技术
缺少检验和测试技术及相关的工具	建立了完整的测试检验技术，文档齐全
涉及科学与工程领域的多个不同学科	主要涉及电子工程与化学工程

从表 1.1 中可以看到这两类技术之间确实有相当大的差别。我们进一步把这两类技术之间的一些重大差别总结如下：

1. 与微电子学领域相比，微系统领域中涉及更多不同类型的材料。除了常用的硅材料之外，在微系统领域中还会采用诸如石英和砷化镓等其他材料作为微系统的衬底材料。在采用 LIGA 工艺制备的微系统中，聚合物和金属材料也是很常用的。微系统的封装技术则会用到各种不同类型的玻璃、塑料以及金属材料，而这些在微电子的封装工艺中则是完全不使用的。
2. 与 IC 设计相比，微系统通常必须设计成能够完成各种不同类型的功能，而 IC 则仅限于完成特定的电子功能。
3. 很多微系统都包含一些可动部件，例如微型阀、泵和齿轮等。还有很多微系统需要流

体流过其中，例如生物传感器和分析系统。各类微光学系统则需要为光束提供输入/输出(I/O)的端口。而集成电路及各类微电子学器件中则没有任何可动部件，也没有任何可供光或流体通过的通道。

4. 集成电路主要是二维的平面结构，通常被局限在硅芯片的表面。而大多数的微系统则包含复杂的三维几何结构。因此机械工程设计任务是微系统产品开发工作中的一个重要组成部分。
5. 集成电路中的核心元件在封装之后通常是由一层钝化保护材料与外界环境隔绝。而微系统中的敏感元件及很多核心元件却要求与工作的媒介相接触，这就给其设计和封装带来了很多技术难题。
6. 微电子器件与集成电路的制造和封装目前已经是非常成熟的工业化技术，有各种文档化的工业标准。而微系统的生产则与这种成熟化的技术还有相当大的距离。正如我们在第9章中将要介绍的，目前微系统领域主要有3种不同的制造技术。由于微系统在结构和功能方面具有极大的多样性，因此这些微系统产品的封装和组装技术目前还停留在初级阶段。

微系统技术的发展之所以比较缓慢，主要是因为微系统技术具有十分复杂的属性。正如我们将要在1.5节中所讲到的，微系统的设计、制造与封装技术会涉及到科学与工程领域的多个不同学科。

1.5 微系统设计与制造的多学科特点

尽管前面提到微制造技术是从集成电路加工技术发展而来的这一事实，但今天的微系统设计与制造技术中还是包含了不少其他科学与工程学科方面的知识。图1.14中展示了自然科学方面的理论及几个工程学科方面的知识在微系统领域的应用。

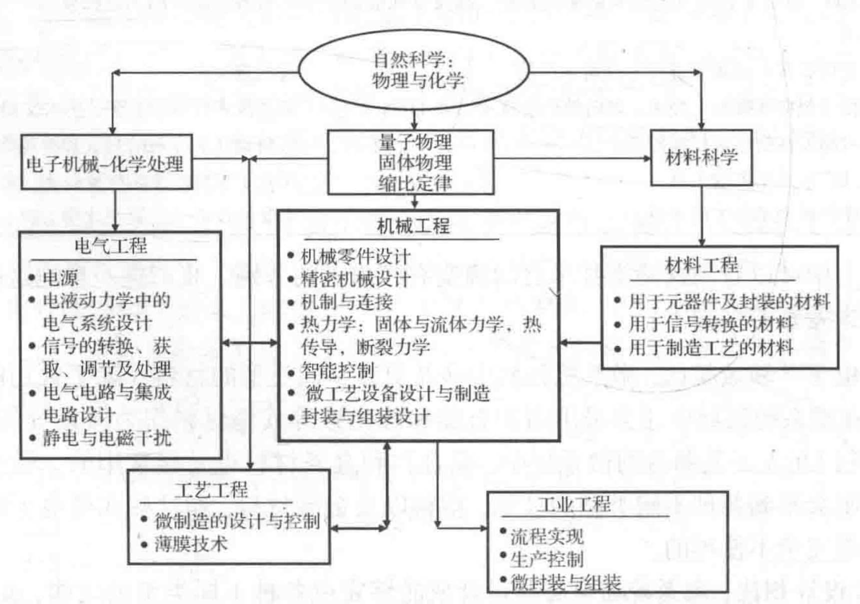


图1.14 微系统设计与制造涉及的科学与工程方面的主要学科

对照图 1.14 可以看到，自然科学理论在与微系统技术相关的下述领域中发挥着重要作用：

1. 在某些微制造工艺中，电化学过程已经被广泛应用于将物质离化的电解工艺中，电化学工艺也被应用于化学传感器的设计中。更为详细的介绍将在第 2 章和第 3 章中给出。
2. 电液动力学原理已经被用于在微管道和导管中驱动流体流动，例如毛细管中的流体流动。这些内容将在第 2 章、第 5 章及第 10 章中介绍。
3. 分子生物学方面的知识与生物传感器及生物医学仪器设备的设计和制造也有着密不可分的关系，这方面的内容将在第 2 章中介绍。在将纳米技术应用于自复制与自组装工艺的开发过程中，也用到了许多基础的分子生物学原理，这一点将在第 12 章中详细论述。
4. 等离子体物理涉及高能离化气体的产生和供给，这是微制造工艺中的刻蚀与沉积工艺所必需的。等离子体的产生将在第 3 章中介绍，而等离子体在微加工技术中的应用则放在第 8 章中介绍。
5. 等比例准则给工程师们深入理解微器件设计中所涉及的物理量按比例缩小提供了一个新思路。在第 6 章中还将会看到并非所有的物理量都能够按照我们的意愿进行按比例缩小。
6. 量子物理已经被用作在微尺度下对不同材料和物质的某些物理特性进行建模的理论基础，在第 12 章中我们将结合微流体流动和固体中的热传导现象对其进行论述。
7. 在微纳尺度材料的描述以及微系统中所应用的材料特性与特征的变化等方面，分子物理提供了很多有用的模型，这方面的内容将在第 3 章、第 7 章和第 12 章中介绍。而分子动力学理论则是描述各种纳米尺度材料力学特性的主要建模工具。

在微系统的设计、制造和封装过程中还会涉及下述 5 个主要工程学科方面的知识：

1. 机械工程原理已经在微系统的结构设计和组件的封装技术中获得了广泛的应用，这其中包括微系统设计分析的方方面面，正如图 1.14 中间的方框图所示。目前微系统的智能化控制尚未得到很好的发展，但是它已成为微机电系统的一个基本组成部分，并被学者们定义为智能微机电系统。
2. 微系统中涉及的电机工程方面的内容包括电能的供给以及功能控制与信号处理电路的设计。对于集成化的微系统而言，例如“片上实验室”，能够将微电子器件与微系统集成于一体的 IC 和微电子电路使得电子工程成为其设计和制造工艺中的一个主要因素。
3. 正如我们将要在第 8 章和第 9 章中所介绍的，化学工程也是微加工与微制造中的一个基本组成要素。几乎所有的工艺过程都包含化学反应。我们在第 11 章中将会看到，某些微器件的封装技术也要依赖于特定的化学反应过程。
4. 材料工程可以为设计工程师们提供适用于微加工、微制造以及封装技术的各种可选材料及其特性表征。分子物理学理论也经常被用于材料特性的设计，例如通过对各种半导体材料进行掺杂处理从而改变其材料的电阻率。材料工程在各类化学、生物及光学传感器的研发过程中也起着一个关键的作用，这一点将在第 2 章中介绍。
5. 微系统的生产和组装过程还涉及工业工程方面的知识。在微系统的生产过程中，微加工工艺的优化设计以及各种所需设备与装置的管控也是一个必不可少的基本环节。多数 MEMS 产品的生产都属于那种批量不太大但是品种比较多的一类，因此比较灵活的微制造体系看起来就是非常有益的，也是人们所渴求的。

1.6 微系统与小型化

可以公正地说，微系统是各种机器和器件在实现最终小型化进程中的一个主要步骤，这一点在1.1节中已经给出了明确的定义，采用微系统技术实现的这种只有尘埃大小的计算机以及只有针尖尺寸的机器人曾经使很多未来学家着迷，并在他们的各种科学幻想小说和书籍中得到了充分的反映。尽管目前的微系统技术仍然处在发展的初期，但是它已经将新世纪的发展目标确定在开发出纳米尺度的器件系统上(1纳米 = 10^{-9}米)。纳米技术的成熟必将会使得人类能够实现今天的工程师和科学家们所梦寐以求的各种超小型化的机器。

按照韦伯斯特词典的解释，小型化这个词的意思就是在更小尺度上的复制。从本质上说，小型化就是一种在保持甚至增强原始物品性能的前提下，极大地缩小复制品尺寸的艺术。由于各种工程系统及设备在最近的10年里正变得越来越复杂精致，因此其对小型化的需求也变得比以往更加突出。能够拥有体积更小的组件，进而获得更小的设备或机器，同时其性能和功能还得到增强，由此所带来的好处从工程的角度来看是显而易见的：

- 体积小的系统比起体积大的系统运动起来更加迅速，因为系统的质量越小，其机械惯性也越小。
- 类似地，因为体积小的系统具有更低的热惯性，所以它对热状态改变的响应速度要比起体积大的系统快得多，因此通过热力实现致动的效率也更高。
- 体积小的系统一般不会产生较大的整体热形变。
- 尺寸较小的小型设备在振动方面遇到的问题也会更少，因为一个系统固有的谐振频率通常是与其质量成反比的。比起目前正在使用的多数大型机器设备来说，质量较轻的微小系统所固有的特征频率要高得多。第2章中介绍的硅基微小紧凑型麦克风之所以能够完全不受谐振膜的共振影响，就是基于这个原理。
- 小型化的系统除了具有更为精准的性能之外，其较小的尺寸也使得它们特别适合于医学和外科手术应用。在微电子组装工艺中，各种小型化的工具也是必不可少的。
- 小型化同时也是卫星和航天器工程中所渴求的，只有这样才能满足其对高精度和有效载荷的特别关注。
- 小型化的系统在运动及空间尺度上的稳定性方面所具有的高精度特点使得它们特别适用于远程通信系统中。

使得工程系统小型化的过程一直是工程师们不断努力的方向。我们已经在各种消费类产品中见证了很多这种小型化带来的结果，这些产品的性能都得到了提升，而其体积却大大减小。这样的产品包括头发吹风机、照相机、收音机和电话机等。从下面的例子中还将看到，在过去的50年里，这些努力如何在其他重要的基础工程产品上产生了更加令人惊异的结果。毫无疑问，随着微系统技术的快速发展，这一发展历程将以更加惊人的速度不断向前加速推进。

或许最重要的小型化过程是由20世纪50年代中期集成电路的发明而引起的。正如我们在1.3节中所描述的，一个极大规模集成电路芯片，其面积只有一个小指甲的大小，但是却可以包含1000万个晶体管。现在一个类似大小的微处理器芯片每秒钟可以完成3亿次以上的运算操作。2007年年初，美国的一家技术领先的微处理器制造商宣布其成功地生产出了特

征尺寸为45纳米的晶体管，这相当于在一根人头发的空间里拥有2000条互连引线。

集成电路和微处理器技术的发展已经使得复杂的数字电子计算机的小型化进程达到了令人惊叹的水平。两位工程师——J. Presper Eckert和John Mauchly，于1946年在美国宾夕法尼亚大学的摩尔电机工程学院公开展示了第一台通用电子数字计算机，其名字叫作ENIAC(即电子数字积分器和计算器)。这个项目最初是由美国陆军在第二次世界大战期间给予资助的。如图1.15所示，这台外形呈U形的计算机长80英尺，高8.5英尺，宽度也有数英尺。其包含20个10位的累加器，每个也都有2英尺长。ENIAC总共包含了18 000个真空管。

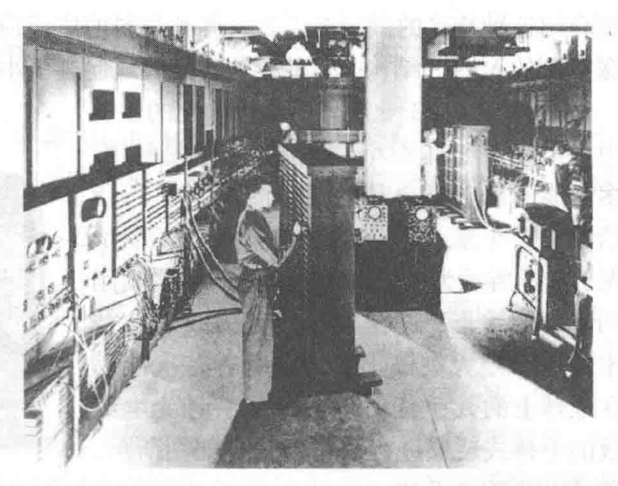


图1.15　1946年诞生的ENIAC数字计算机(经宾夕法尼亚大学工程与应用科学学院许可使用，该学院的前身即摩尔电机工程学院)

在庆祝ENIAC诞生50周年的庆典上，在该大学工作的Van der Spiegel博士与他的研究小组的同学们一起将最原始的ENIAC缩小到了一个微小的芯片上，而其性能却保持不变(如图1.16所示)(参见[Van der Spiegel等人，1998])。

与ENIAC形成强烈对比的是，目前一个典型的笔记本电脑或膝上型计算机只有14英寸长、10英寸宽和1英寸厚，如图1.17所示。而ENIAC的体积估计为4000立方英尺左右，它要比今天的膝上型计算机大5个数量级以上，可是后者的计算速度却比ENIAC要快6~8个数量级。这个令人震惊的小型化过程只用了50年时间就实现了！

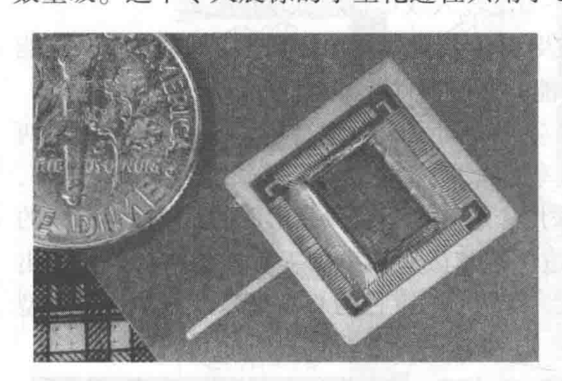


图1.16　“小型化”的ENIAC(经宾夕法尼亚大学工程与应用科学学院许可使用，该学院的前身即摩尔电机工程学院)

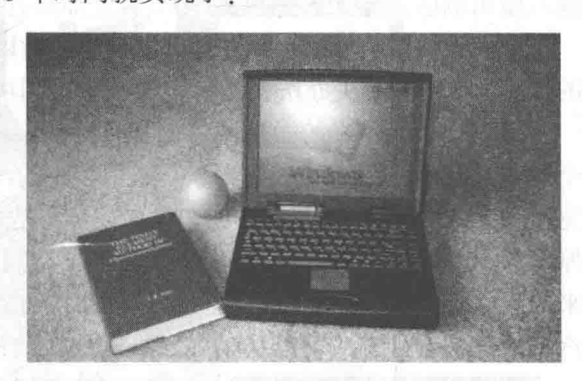


图1.17　2000年前后的膝上型计算机

在过去的20年里，从集成电路制造工艺演变过来的微加工技术已经使得人们能够制造出尺寸达到微米甚至亚微米水平的机械部件。在前面的章节中我们已经介绍了许多这样的器件和部件。尽管大部分的传感器和致动器件都采用硅作为主要材料，但是像镍以及各类陶瓷材料等也已经得到了应用。具有高深宽比的微结构(所谓深宽比就是高度和表面宽度的比例)也已经采用LIGA工艺成功地制造出来了，如图1.9~图1.11所示。我们将在第9章中详

细介绍这种特殊的微制造工艺。各类材料的广泛应用，再加上采用 LIGA 工艺可以制造出高深宽比的 MEMS 结构，二者相结合极大地促进了小型化机器的生产。

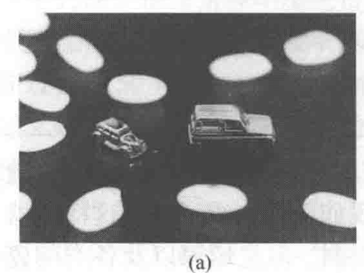
另一个推动工业产品不断小型化的驱动力是市场对于体积小、智能化、坚固耐用、多功能的消费类产品的强烈需求。图 1.18 给出了近年来个人移动通信设备的发展情况，左图所示为 15 年前移动电话装置刚刚问世时的情形，这在当时也是无线通信技术的一个重大突破，因为消费者首次能够在地球上的几乎任何地方使用一种无电缆线的手持式装置进行语音通信。如图所示，移动电话的普及更进一步加快了其朝着目前这种体积更小、用途更广泛的电话装置以及功能更为强大的个人数字助理(PDA)方向发展的进程。虽然这种无线通信器材体积的缩小不像数字计算机那样令人震惊，但是它们所能实现的功能却是实实在在令人惊奇的：现在的一部手机电话，体积只有当初刚出现时的 1/4 左右，除了可以用作语音通信之外，还可以用作时钟、日历、视频摄像机或照相机，甚至还可以用作一个通过卫星和全球定位系统(GPS)实现的实时定位设备。PDA 装置可以和计算、电话/传真、互联网以及各种网络功能相结合，一个典型的 PDA 装置可以实现移动电话、传真发送机、网络浏览器、个人备忘记事本等多种功能。和膝上型计算机有所不同的是，大多数 PDA 装置都使用手写笔输入方式来进行操作，而不是使用键盘输入方式，这也就意味着 PDA 装置还具备了手写体输入的识别功能。某些 PDA 装置还能够利用语音识别技术对语音输入做出响应。今天大多数的 PDA 装置都具有手写笔输入或键盘输入功能。

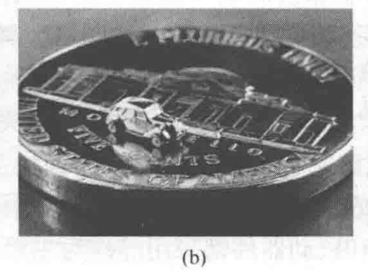


图 1.18　移动通信器材的发展

我们很快就会看到，要生产出像移动电话以及 PDA 装置这样的体积小、智能化、多功能的产品，唯一的解决办法就是将多种具有不同功能的微型部件封装在同一个装置中。

另一个令人惊奇的微机械实例是日本 Denso 公司研制出的微型汽车。图 1.19 展示了两个体积只有米粒大小的微型汽车。图中较小的汽车重量只有 33 毫克，其长度为 4.785 毫米，宽度为 1.73 毫米，高度为 1.736 毫米。车身是采用非电解的镀镍薄膜形成的，该镀镍薄膜的厚度为 30 微米。这两个微型汽车是将半导体制造工艺与微型精密加工技术相结合而制造出来的。驱动这两个汽车的电动机采用磁感应方式，其转子的直径为 0.6 毫米。有关这些微型汽车的详细设计方法可以从 Teshigahara 等人的论文中获得[Teshigahara 等人，1995]。


(a)


(b)

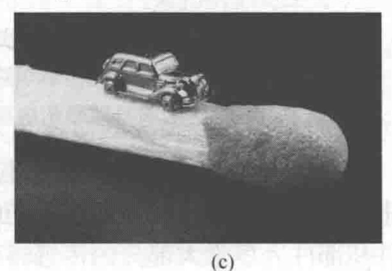

(c)

图 1.19　微型电动汽车：(a)与米粒大小相比；(b)与一个 5 美分的硬币大小相比；(c)停留在一个火柴头末端的微型汽车

1.7　微系统在汽车工业中的应用

随着微加工和小型化技术的持续发展，各种 MEMS 和微系统产品已经在商业市场的每个方面越来越占据主导地位。目前，这类产品的两个主要商业市场是：(1)信息技术产业，包括喷墨打印头和数据存储系统中的读/写元件的生产；(2)汽车工业。在此我们将集中讨论第二类产品，因为这类产品的品种十分繁多。

汽车工业在过去的 20 年里一直是 MEMS 技术的主要用户，因为其市场规模巨大。一份 1991 年的报告指出汽车工业一年的产量是 800 万辆汽车，而其中有 600 万辆汽车是在美国生产的[Sulouff，1991]。美国的汽车产量在 2005 年上升到了 1700 万辆(美国国家地理杂志，2005)。在汽车中应用 MEMS 和微系统产品的主要动机是为了使汽车中的乘客更安全、驾驶更舒适，同时也是为了达到政府所要求的高的燃油效率和低的排放标准。总之，这类产品的广泛使用确确实实能够使汽车变得更加灵巧，以满足消费者的各种需要。“智能汽车”这个术语是在一份贸易杂志的特刊的封面故事中首次出现的[智能汽车，1988]。许多在当时看起来似乎是天方夜谭的有关智能汽车智慧功能的各种预言，在今天不同类型的汽车中实际上已经变成了现实。

智能交通工具是建立在广泛使用各类传感器和致动器的基础之上的。各种不同类型的传感器被用来检测周围环境或道路的状况，同时也有大量的致动器被用来执行特定的动作，以便应对这些检测到的不同状况。微型传感器和微型致动器的出现，使得汽车制造商能够使用体积更小的这类元器件，同时也就能够使用数量更多的这类元器件，这样就能以更加有效的方式来应对各种不同的状况。有一份早期的研究报告全面地总结了各种传感器和致动器的应用[Paulsen 和 Giachino，1989]。不同类型的传感器已经被广泛地应用于汽车的发动机中，如图 1.20 所示。图 1.21 则给出了压力传感器在汽车中的应用。

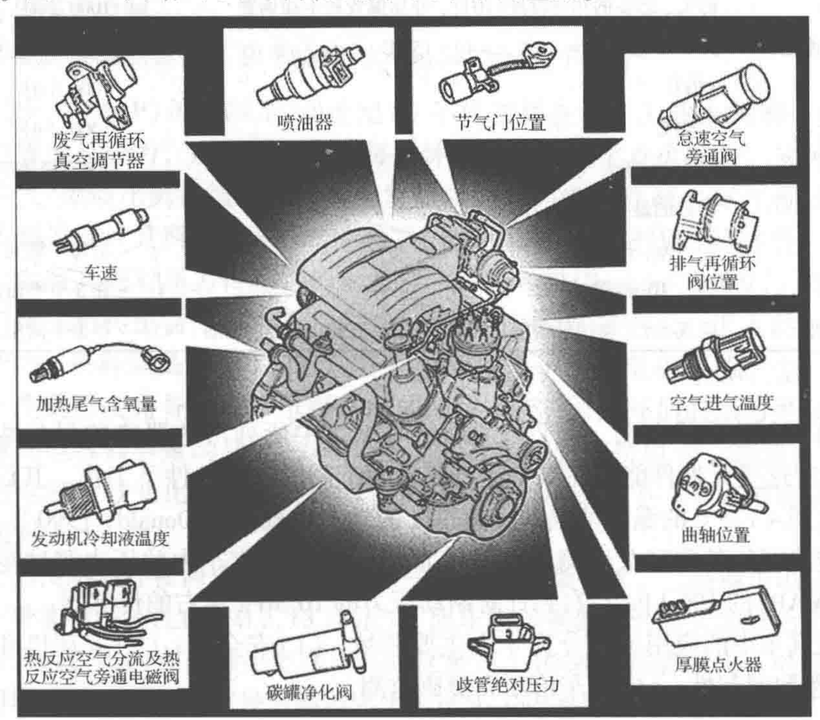


图 1.20　在一辆汽车的发动机和动力传动系统中用到的传感器(经[Paulsen 和 Giachino，1989]许可使用)

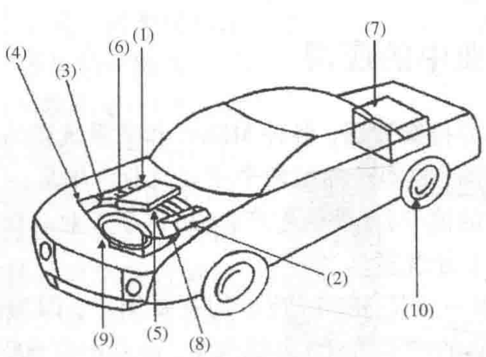


图1.21　汽车中应用的压力传感器(经[Chiou, 1999]许可使用)

要使汽车的设计和生产能够满足上述这些预期，这就给工程师们提出了一个很大的挑战，因为从几份调查报告[Giachino和Miree, 1995；Chiou, 1999]中都可以看到人们期望这些汽车将来在非常极端的环境条件下还能够正常运行。表1.2中给出了汽车工业对其使用的MEMS元器件所需进行的某些耐久性试验的严格要求。

表1.2　典型的耐久性要求

测试项目	测试条件	耐久性要求
高温偏置	100℃，5 V	1000小时
热冲击	−40～150℃	1000个循环
温度与湿度影响	85℃、85%的相对湿度(RH)，外加偏置和不加偏置	1000小时
压力、功率、温度循环	20 kPa至大气压，5 V，−40～150℃	3000小时
高温存储	150℃	1000小时
低温存储	−40℃	1000小时
压力循环	700 kPa至大气压	200万个循环
过压测试	两倍的最大工作压力	
振动	2～40g，扫频，位置相关	沿每个轴向30小时以上
冲击	50g，10 ms脉冲	在3个平面内重复100次
流体/介质兼容性	空气、水、腐蚀性溶液、汽油、甲醇、乙醇、柴油、机油	根据不同用途有所区别

资料来源：[Chiou, 1999]。

对于传感器和致动器来说，除了必须满足表1.2中所列出的严格的耐久性测试条件之外，人们还希望这类元器件能够在汽车运行的极端苛刻的环境条件下工作。其设计条件通常包括从−40℃到+125℃的温度范围和高达50g的动态负载[MacDonald, 1990]。表1.2给出了有关压力传感器的某些耐久性测试条件[Chiou, 1999]。汽车中的压力测试范围从针对歧管绝对压力(MAP)的100 kPa左右到针对制动压力的10 MPa左右的传感器。

微系统在汽车中的应用可以分为4个主要领域：(1)安全性；(2)发动机和动力传动系统；(3)舒适性和便利性；(4)汽车诊断和健康监测。

1.7.1　安全性

- 在汽车中的安装气囊展开系统，可以保护驾驶员和乘客避免在严重的汽车碰撞事故中受到伤害，该系统中会用到微加速度计或微型惯性传感器，如图 1.6 和图 1.8 所示。
- 采用了位置传感器的防抱死制动系统可以使得驾驶员在对汽车进行制动刹车时仍然能够对汽车进行有效的控制。
- 悬架系统，它采用了位移、位置和压力传感器以及微型阀等元器件，来减缓汽车中可能引起结构损坏和使乘客感到不舒适的剧烈振动。
- 目标避让系统，它采用了压力传感器和位移传感器等元器件，使得驾驶员能够检测出汽车运行前方路径上的障碍物。
- 采用微陀螺仪和 GPS 的自动导航系统能够引导汽车在危险和复杂地形的区域安全行驶。

1.7.2　发动机和动力传动系统

各种不同类型的传感器已经被应用在多款新型汽车的发动机上，如图 1.20 所示[Paulsen 和 Giachino，1989]。以下所列的是其中的一些传感器：

- 用于歧管控制的压力传感器
- 气流控制
- 排气分析与控制(见图 1.21)
- 曲轴定位
- 燃油泵压力和燃油喷射控制
- 传动力与压力控制
- 发动机爆震检测以提高其功率输出[Keneyasu 等人，1995]

歧管绝对压力(MAP)传感器是 20 世纪 80 年代初用在汽车工业上的第一种微传感器。它可以测量歧管绝对压力，并配合发动机每分钟的转速来确定点火提前。这种点火时间控制与最佳的空气/燃油比例相结合可以优化发动机的动力性能并减少尾气排放。早期的歧管绝对压力传感器设计是所谓的 SCAP 传感器(即硅电容式绝对压力传感器)。图 1.22 是一个典型的硅电容式绝对压力传感器的示意图[Paulsen 和 Giachino，1989]。歧管的气体由管状的进气口进入到传感器中，如图 1.22(a)和(b)中的顶部所示。进入的气体将对一层硅膜上施加压力，该硅膜是如图 1.22(c)所示的腔室上下两个电极中的一个。硅膜在外加压力作用下产生的形变将导致两个电极之间的间隙改变，因此外加的压力可以和由上述两个电极所形成的电容器容量的变化一一对应。采用合适的电桥电路，如图 2.11 所示，就可以将输出的电容信号变化转换成电压信号。图 1.22(d)展示了一个硅电容式绝对压力传感器组件的相对大小。

电容式压力传感器存在两个主要的不足：一是体积略微偏大，二是输出电压值与输入的压力之间存在着非线性特性(如图 2.13 所示)。而压阻转换器(PRT)式的压力传感器则能够提供与外加压力成正比的直流输出电压，因此这种压力传感器逐渐取代了电容式压力传感器。此外采用压阻式器件作为信号转换器还大大减小了传感器的尺寸。

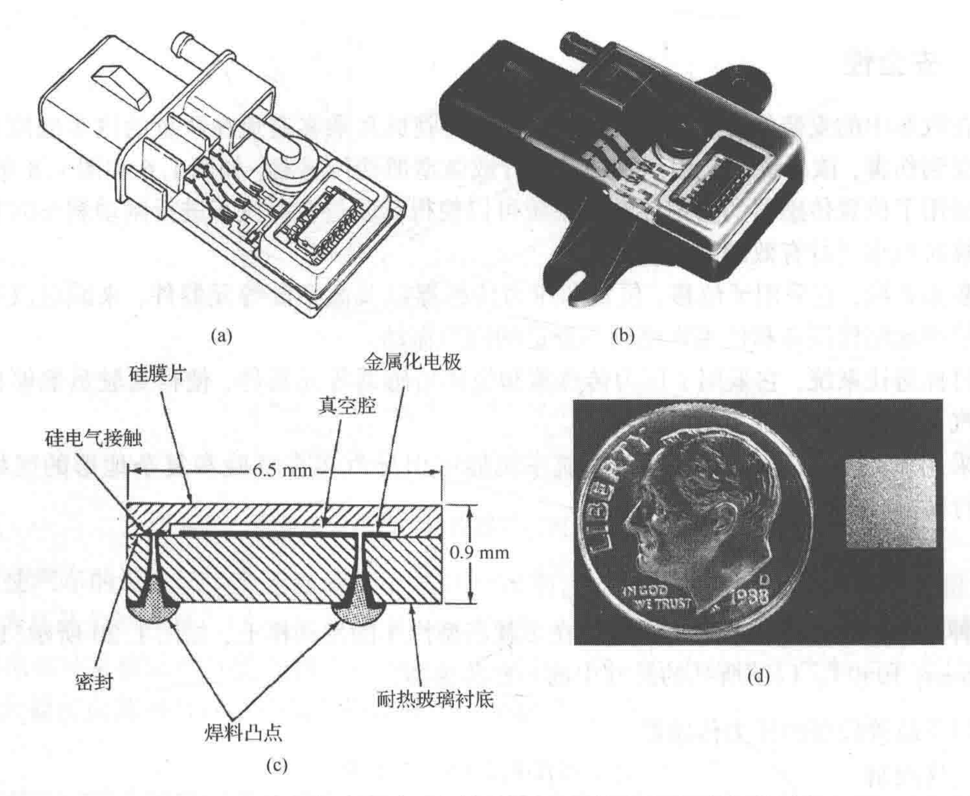


图1.22 硅电容式绝对压力传感器(经福特汽车公司许可使用)

1.7.3 舒适性和便利性

- 座椅控制(位移传感器和微型阀)
- 驾乘人员的舒适性(用于空气质量、气流、温度和湿度检测与控制的传感器)
- 安全性(远程状态监测和使用权控制传感器)
- 用于挡风玻璃除雾的传感器
- 卫星导航传感器

1.7.4 汽车诊断和健康监测

- 发动机冷却液温度与质量
- 发动机润滑油压力、液面与质量
- 轮胎压力(如图1.21所示)
- 刹车制动油压力
- 变速器油液(如图1.21所示)
- 燃油压力(如图1.21所示)

1.7.5 未来汽车应用

一份调查报告[Powers和Nicastri, 1999]指出1996年一年全世界共生产了5200万辆汽车,而由于全球经济的增长,当时预计这一数字到2005年将增长到6500万辆。消费者对于汽车的安全性、舒适性以及其他各方面性能的要求也会继续增长。我们有充分的理由相信未来的汽车将会使用更多的微处理器,也会用到更多的微传感器和致动器(如图1.23所示),

从而使其成为真正的智能汽车。图 1.24 展示了这些传感器，在未来的汽车应用中，它们中的绝大多数都将是微尺度的。

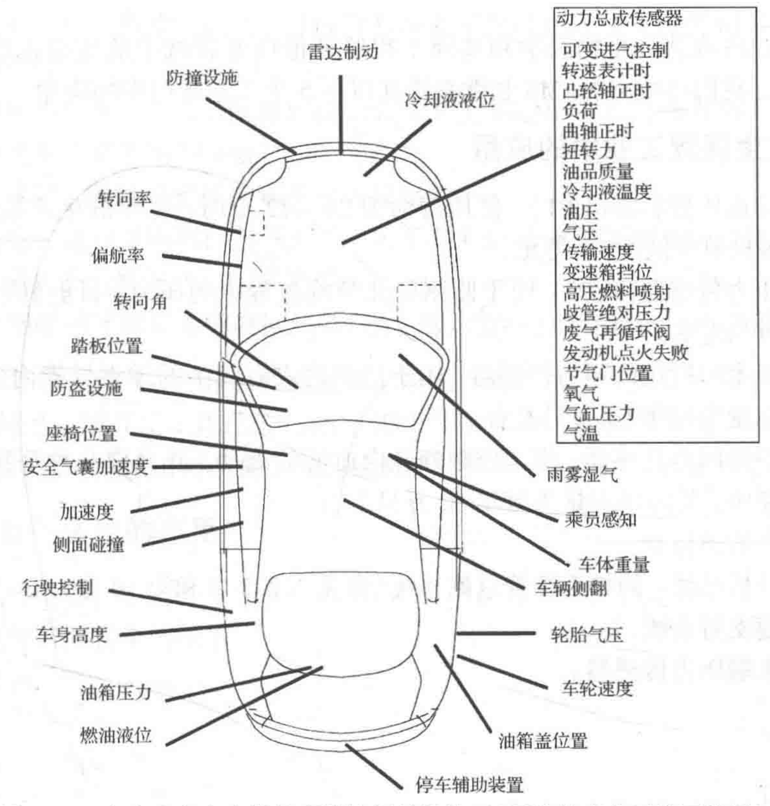


图 1.23　未来汽车中由微处理器控制的组件（经福特汽车公司许可使用）

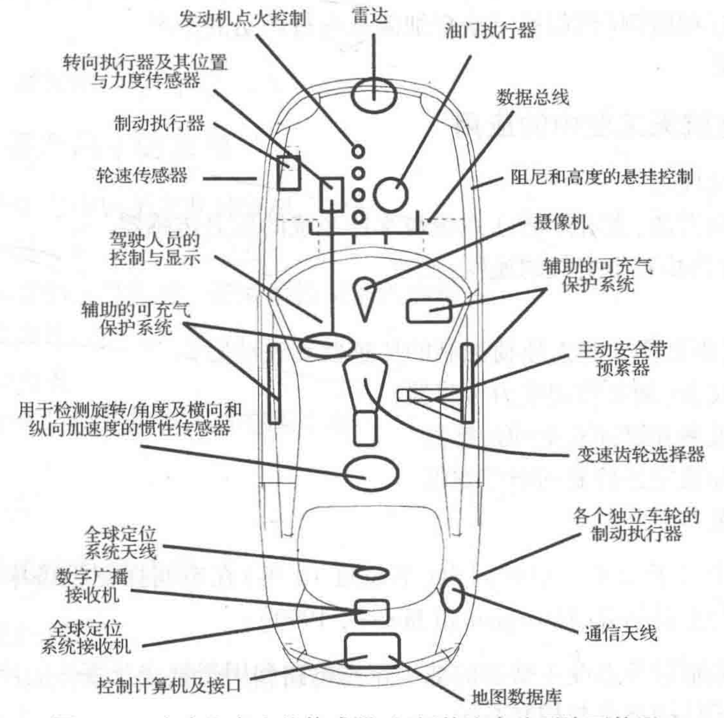


图 1.24　未来汽车中的传感器（经福特汽车公司许可使用）

1.8 微系统在其他工业中的应用

近年来 MEMS 在诸如生物医学和基因工程等其他商业领域中的应用正以令人惊异的速度在迅速兴起。我们将给出 MEMS 和微系统在以下 5 个工业部门中的应用。

1.8.1 在卫生保健工业中的应用

- 一次性的血压传感器(DPT)：使用寿命为 24 ~ 72 小时；每年的生产数量为 1700 万只左右，每只单价低于 10 美元。
- 子宫内压力传感器(IUP)：用于监测婴儿分娩过程中的压力；目前的市场需求量为每年 100 万只左右。
- 血管成形术中所用的压力传感器：用于监测进入血管中的球囊导管内的压力；目前的市场需求量为每年 50 万只左右。
- 输液泵用的压力传感器：用于控制静脉内血液的流动，并允许几种药物混合进入一个流体管道中；其市场容量为每年 20 万只左右。
- 其他的产品还包括：
  诊断和分析系统，例如毛细管电泳系统(参见 2.2.2 节和第 10 章)。
  人类保健支持系统。
  导尿管末端压力传感器。
  血压计。
  呼吸机。
  肺活量计。
  大气压校正仪。
  制药工艺过程监测(例如通过培育细菌来进行药品的生产)。
  肾透析设备。

1.8.2 在航空航天工业中的应用

- 飞行员座舱仪表
  用于检测润滑油、燃油、传送系统与水压系统的压力传感器
  空速(飞行器相对于空气的速度)测量
  高度计
- 安全设备(例如用于弹射座椅控制的传感器和致动器)
- 风洞测量仪表(例如剪切应力传感器)
- 用于燃油效率和燃油安全的传感器
- 用于导航和稳定性控制的微陀螺仪
- 微小型卫星

下面给出一个关于未来一段时间内(不超过 10 年)在空间探测设备中可能用到的各类 MEMS 和微系统的汇总结果[Helvajian 和 Janson, 1999]：

- 用于对超强辐射及温度不敏感的数字逻辑电路和用于锁定及复位的片上热控开关的带有微机电元件的指令与控制系统。

- 带有微陀螺仪、加速度计以及光纤陀螺的惯性导航系统。
- 带有微型太阳及地球传感器、磁场强度计和推进器的空间姿态测定与控制系统。
- 带有微机电元件的阻塞二极管、可进行有源太阳能电池阵列重构的切换开关以及发电机的动力系统。
- 带有微型压力传感器、用于泄漏监测的化学传感器、单冲程推进器阵列、连续微推进器和脉冲微推进器的推进系统。
- 带有微型热管、散热器和热控开关的热控制系统。
- 包含有极高带宽和低电阻的射频开关、用于激光通信的微镜和光学系统以及微型可变电容、电感和振荡器的通信与雷达系统。
- 包含有微型磁场计和重力梯度监测器(纳 g 加速度计)的空间环境传感器。

在最近的几年里，人们对于包含微推进剂、喷嘴、喷气发动机以及推进器[Janson 等人，1999]在内的微推进系统开发工作已经付出了相当多的努力，也取得了相当大的进展。在这几个方面具有支撑性的机械工程学科主要包括微流体建模、微燃烧和火箭科学。

1.8.3 在工业产品中的应用

- 制造工艺传感器：工艺压力传感器(每年需求量超过 20 万只)。
- 用于下述领域的各类传感器：
  液压系统；
  喷漆器；
  农业灌溉与喷雾；
  致冷系统；
  加热、通风与空调系统；
  水位控制；
  电话缆线泄漏检测。

1.8.4 在消费类产品中的应用

- 潜水用的呼吸器中的手表和计算机。
- 自行车载的计算机。
- 带有液压装置的健身器材，带液面控制的洗涤设备。
- 带有自动减震控制的运动鞋。
- 数字轮胎压力表。
- 带有可自动调节刷轮位置的真空吸尘器。
- 智能玩具。
- 智能家用电器。

1.8.5 在远程通信中的应用

- 光开关和光纤耦合器。
- 无线系统中的射频(RF)MEMS 器件[Rebeiz，2003]。
- 可调节的谐振器。

1.9 微系统产品的市场

随着新的MEMS和微系统产品的出现，这些产品的市场也在急剧地扩大。表1.3给出了截至1999年的世界市场估计值。

表1.3 全世界范围的硅基微传感器市场

年份	数量(×1000)	销售收入(百万美元)	平均单价(美元)	收入增长率(%)
1989	3026	570.50	188.53	—
1990	5741	744.60	129.70	30.5
1991	6844	851.70	124.44	14.4
1992	7760	925.40	119.25	8.6
1993	8816	977.10	110.83	5.6
1994	10 836	1116.20	103.00	14.2
1995	13 980	1316.30	94.16	17.9
1996	18 127	1564.40	86.30	18.9
1997	23 514	1857.60	79.00	18.7
1998	30 355	2199.80	72.47	18.4
1999	38 792	2593.80	66.86	17.9

资料来源：[Frost & Sullivan Market Intelligence, 1993].(www.frost.com/prod/servlet/frost-home)

从表1.3中可以看到自1992年以来的复合年增长率达到15.9%。随着产量的不断增大，单位价格持续下降。

如果按照NEXUS(这是一个欧洲的联合体，他们发起了多功能微系统的理想网络)给出的关于MEMS和微系统产品的定义，MEMS产品的市场已经出现了巨大的增长。这里面包括各种正在设计中的微结构产品，例如各类单片和混合的元件、硅基器件以及各种微机械部件。1996年和2002年已经成熟的MEMS产品的市场情况如表1.4所示。

表1.4 已经成熟的MEMS产品市场增长情况

MEMS产品	1996年(10^6数量/$\$10^6$收入)	2002年(10^6数量/$\$10^6$收入)
硬盘驱动器读写头	530/4500	1500/12 000
喷墨打印头	100/4400	500/10 000
心脏起搏器	0.5/1000	0.8/3700
体外诊断用具	700/450	4000/2800
助听器	4/1150	7/2000
压力传感器	115/600	309/1300
化学传感器	100/300	400/800
红外影像仪	0.01/220	04/800
加速度计	24/240	90/430
陀螺仪	6/150	30/360
磁阻传感器	15/20	60/60
显微测谱仪	0.006/3	0.15/40
合计	1595/$13 033	6807/$34 290

资料来源：http://www.wtec.org/loyal/mcc/mems_eu/pages/chapter-6.html.

NEXUS 还给出了从 2000 年到 2005 年 MEMS 和微系统产品的市场增长情况，如图 1.25 所示。

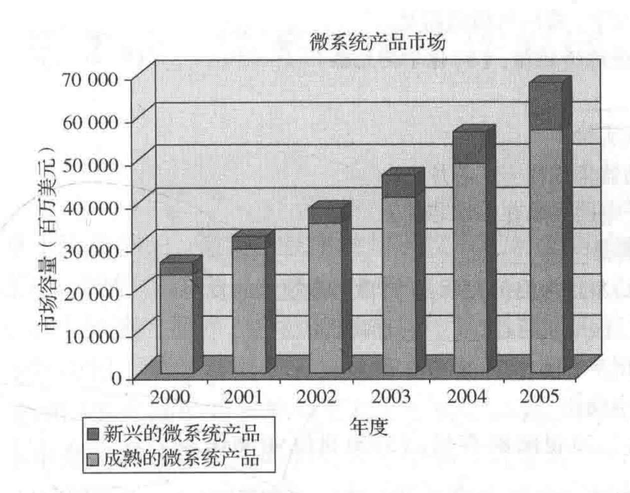


图 1.25　已经成熟的和正在兴起的 MEMS 与微系统产品的市场增长情况（资料来源：Nexus：http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=3424.）

从图 1.25 中可以看到，信息技术领域的各类外部设备（包括硬盘驱动器的读写头以及喷墨打印头）占据了微系统市场的主要份额，而像心脏起搏器和助听器这类的生物医疗产品，以及其他诸如片上实验室分析系统等新兴的生物医学产品则紧跟信息技术外部设备的市场增长。图 1.25 中给出的新兴微系统产品还包括光学鼠标传感器、家用电器产品、指纹传感器以及植入人体的药物输送系统等。微系统产品另一个潜在的重要市场则是应用于家庭和工业设备中的平板显示器。

本章习题

第一部分：多项选择题

1. 目前 MEMS 产品最大的市场份额属于________。
   (1) 微压力传感器；(2) 信息技术外部设备；(3) 微加速度计
2. MEMS 元件的尺寸范围是________。
   (1) 从 1 μm 到 1 mm；(2) 从 1 nm 到 1 μm；(3) 从 1 mm 到 1 cm
3. 1 nm 是________。
   (1) 10^{-6} m；(2) 10^{-9} m；(3) 10^{-12} m
4. 当我们说一个器件是中等尺度的时候，就意味着该器件的尺寸范围是________。
   (1) 1 μm 到 1 mm；(2) 1 nm 到 1 μm；(3) 1 mm 到 1 cm
5. 微系统的起源可以追溯到________的发明。
   (1) 晶体管；(2) 集成电路；(3) 硅压敏电阻
6. 一个现代的集成电路有可能包含________个晶体管和电容器。
   (1) 100 000；(2) 1 000 000；(3) 10 000 000
7. 计算机能够变得小型化，主要是因为________。
   (1) 更好的存储系统；(2) 用晶体管代替了真空管；(3) 集成电路的发明

8. 一般来说，一个微系统包括________个部件。

(1)1；(2)2；(3)3

9. 在汽车的气囊展开系统中，常用的传感器是________。

(1)压力传感器；(2)惯性传感器；(3)化学传感器

10. “片上实验室”意味着________。

(1)在一块芯片上开展实验；

(2)将微传感器和致动器集成在一块芯片上；

(3)将微系统和微电子电路集成在一块芯片上

11. 现代微加工技术的起源是________。

(1)晶体管的发明；(2)集成电路的发明；(3)微制造技术的发明

12. 第一个重大的小型化过程是伴随着________而出现的。

(1)集成电路；(2)笔记本电脑；(3)移动电话

13. “微制造”这个词首次出现在________。

(1)20世纪70年代；(2)20世纪80年代；(3)20世纪90年代

14. “LIGA”这个词指的是________。

(1)一种微制造工艺；(2)一种微加工工艺；(3)一种材料处理工艺

15. 典型的一块特大规模集成电路(ULSI)芯片可能包含________个晶体管。

(1)100万；(2)1000万；(3)1亿

16. 集成电路的发展始于________。

(1)20世纪60年代；(2)20世纪70年代；(3)20世纪50年代

17. 第一台数字计算机ENIAC是在________研制出来的。

(1)20世纪60年代；(2)20世纪50年代；(3)20世纪40年代

18. 一个微系统组件的“深宽比”被定义为________之比。

(1)高度尺寸和表面尺寸；(2)表面尺寸和高度尺寸；(3)宽度尺寸和长度尺寸

19. 微系统的市场价值与其________密切相关。

(1)大量的需求；(2)独有的特色；(3)产品的性能

20. 目前对于微系统技术最有挑战性的论题是关于________。

(1)产品的小尺寸；(2)其实际应用的不足；(3)它的多学科特点

第二部分：简述题

1. 举出3个你认为尺寸在1毫米左右的实际物体的例子。
2. 解释MEMS与微系统二者的区别。
3. 微系统技术与微电子技术二者之间最显著的区别是什么？
4. 微电子技术为何不能直接用于MEMS和微系统产品的设计与封装中？
5. 为什么传统的机械研磨、钻和焊接等制造技术不能直接用于生产微系统？
6. 给出至少4个将机器和器件小型化之后带来的明显优点。
7. 给出两个你见过并且赞赏的消费类产品小型化的实例。
8. 通过你自己的独立分析研究，或请教你的医生，举出至少一个有关MEMS应用于生物医疗方面的实例，以说明其比起传统的方法或器件具有突出的优点。
9. 通过分析研究，给出一个汽车安全气囊展开系统的配置。
10. 根据你的学术和职业背景，描述你在这个具有多学科特点的微系统技术中扮演什么样的角色比较合适。

第2章 微系统的工作原理

2.1 引言

正如我们在第1章中所看到的，微制造技术的快速发展已经使得许多新型的MEMS产品出现在市场上。在本章中，我们将给出一些典型的MEMS器件及微系统的工作原理。读者很快就会了解，正如1.5节中描述的那样，各类MEMS和微系统产品的设计和制造涉及了科学与工程领域多学科理论的应用。学习掌握了大量这类器件的工作原理之后可以使得工程师们在设计和制造各种新型MEMS产品的时候能够更具有悟性。不过，我们也只能给出描述这些工作原理所必需的基本信息。对这类器件的制造工艺和加工过程的详细描述可以参阅两本主要文献——[Madou, 1997]和[Kovacs, 1998]。对于相关产品的几何结构以及一些早期产品中各类微器件的制造技术的描述，读者可以在一篇很好的综述性文献[Trimmer, 1997]中查阅到。但是读者也应该认识到，本章中所选取介绍的一些微器件主要是基于它们充满新意的想法，事实上可能其中许多器件在市场上并没有获得成功。

2.2 微传感器

微传感器是目前获得最广泛应用的一类MEMS器件。按照文献[Madou, 1997]中给出的定义，传感器就是这样一种器件，它能够将能量由一种形式转变为另一种形式，同时依据特定的可测量的输入信号给用户提供一种可用的能量输出。例如，在压力传感器中就是将引起薄膜变形所需的能量转变为电能(信号)输出。图1.1所示是一个由传感元件及相关的信号处理硬件组成的传感器系统。一个智能传感器单元应该具有自动校准、干扰信号消减、寄生效应补偿、失调偏移修正和自检测功能。所有这些附加的功能使得该传感器单元最终成为一个智能化的微系统，如图1.7所示。

我们在第1章中已经介绍过，微传感器可以用来测量很多物理量。一般说来，它们覆盖了10个不同的测量领域[White, 1987]，后面我们将会介绍它们的主要应用领域。在各个不同的产业中，都有大量微传感器可以用来实现各种不同的功能。对于这些传感器的诸多详细描述可以在文献[Madou, 1997]和[Kovacs, 1998]中找到。下面将重点介绍其中几种传感器的工作原理。

2.2.1 声学波传感器

对于许多新兴的工业产品来说，声学波传感器既具有极高的灵敏度，又具有很好的可靠性。从每年30亿只的需求量来看，通信产业是这类传感器的主要用户。这类传感器的主要用途是用作移动电话与基站中的带通滤波器[Drafts, 2000]。声学波传感器快速的市场增长还包括汽车中应用的扭矩传感器和轮胎压力传感器，医学上应用的化学传感器和生物传感器，以及工业和商业上大量应用的各种气体传感器、湿度传感器、温度传感器和质量传感器。声学波器件还可以在微流控系统中用来驱动流体的流动。

严格来说,“声学波”这个术语用在这里是有可能产生歧义的,因为在相关的传感器中产生的波,并不是像字面上所指出的那样,与声音有多少直接的关系。更确切地说,在这些传感器中所产生的波更多的是与传播这些波的介质中的应力或形变密切相关的。在后面的介绍中,无论传感器中所涉及到的波的形态是什么样的,我们都将继续沿用“声学波”这个术语。

声学波传感器的工作原理涉及探测声学波在通过某种媒介传播的过程中,由于其他异质材料的存在,所引起的媒介传播特性的改变,这些特性包括质量和粘弹性(所谓粘弹性,简言之,就是材料的弹性特性随着时间的变化情况),或者是一些其他可测量的特性参量,例如湿度或化学成分,也可能是传播媒介几何结构和尺寸的改变。

在传感器中产生声学波是需要驱动能量的,这个驱动能量通常由两种主要机理来获得:压电效应和磁致伸缩效应。特别是压电效应可以说是产生声学波的一种更为普遍的方法。采用压电晶体材料,例如石英,就是一种将机械能转变为电能的常用手段,反过来,也可以将电能转变为机械能。我们将在2.3.3节和第7章中了解到更多有关压电晶体方面的知识。

图2.1显示了一个常见的利用压电晶体材料作为传输介质的声表面波(SAW)传感器的工作原理。在一块由氧化铝构成的衬底上淀积一层较厚的压电薄膜材料,然后再在这层压电薄膜表面淀积一层较薄的导电薄膜,例如金属铝薄膜,最终由这层金属铝薄膜形成两组电极。其中一组电极用来产生激励的声波,另一组电极则用来探测波的频率和振幅等特性。这两组电极各有两个导电臂,每个导电臂分别连接了数个紧密排列的指状电极。对于用来产生声波的那一组电极来说,随着外加交流(AC)电源所施加电场的变化,静电力将会导致指状电极之间的间隙变得更为紧密或疏松。由于指状电极是附着在压电薄膜的表面上,因此上述指状电极之间间隙的变化就会进一步导致其下方较厚的压电薄膜表面发生拉伸和压缩。这样就会产生一个随空间变化的波,并且它会沿着压电薄膜的表面传播。与这个空间变化的波相关的机械能最终将通过较厚的压电薄膜传播到另一组电极的位置,如图所示。这一组电极将起到输出端叉指换能器的作用(IDT),它可以探测并记录通过压电薄膜传播过来的波的频率和振幅。当有其他任何异质材料存在时,就会引起波的传播特性发生改变,因此通过测量这种这种变化就可以获得有关待检测物质的特征和数量等信息。

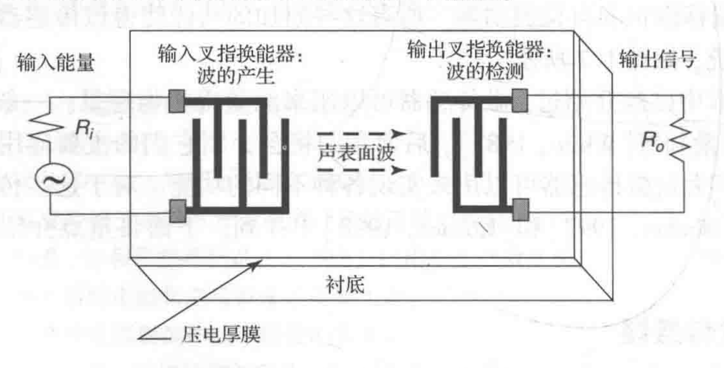


图2.1 典型的声表面波传感器

2.2.2 生物医学传感器和生物传感器

近年来生物医学产业已经变成了继汽车产业之后微系统产品的另一个主要用户。BioMEMS这个术语也已经被MEMS产业和学术界广泛地使用,它包含:(1)生物传感器;(2)生物仪器和外科手术工具;(3)用于对生物物质进行快速、精确、低成本检测的生物测试和分析系统。

BioMEMS 给工程师们提出了一个巨大的挑战，因为设计和制造这种类型的传感器既要求设计者具有工程技术领域的知识和经验，还要求设计者具有分子生物学和物理化学方面的知识和经验。

将 MEMS 技术应用于生物医学领域所涉及的技术问题主要包括以下几个方面：

1. 生物医学操作的功能性；
2. 对现有仪器和设备的适应性；
3. 与患者生物系统的兼容性；
4. 类似腹腔镜检查术所要求的可控性、机动性、易导向性；
5. 具有高深宽比 MEMS 结构的加工技术，其中深宽比定义为结构的深度与表面尺寸的比值。

微传感器是构成任何一种生物 MEMS 产品的最基本单元。在生物医学领域，通常应用两种类型的传感器：(a)生物医学传感器；(b)生物传感器。生物医学传感器是用来检测生物物质的，而生物传感器则可以被更广泛地定义为任何含有生物成分的测量设备[Buerk 1993]。这些传感器通常会涉及生物分子，例如生物抗体和生物酶，它们会与被检测的分析物发生互相作用。

生物医学传感器　生物医学传感器可以划分为用来测量生物物质的生物医学仪器以及用于医学诊断目的仪器这两大类。这些传感器可以快速而准确地分析生物样本。这些小型化的生物医学传感器比起传统的分析仪器具有很多的优点。它们通常只需要很小量的样本，并且能够以更快的速度进行分析，甚至几乎没有死区。目前市场上已经有很多不同类型的生物医学传感器。

电化学传感器的工作原理是这样的，某些生物物质，例如人体血液中的葡萄糖，能够通过化学反应释放出某些元素，而这些元素则能够改变传感器中的电流模式，这样一来就很容易被检测出来。下面给出的就是这类传感器的一个实例[Kovacs, 1998]。

在图 2.2 中，把少量的血液样本通过聚乙烯醇溶液溶解后放入一个传感器中，该传感器上置有两个电极，一个是金属铂的薄膜电极，另一个是银/氯化银薄膜构成的参考电极。血液样本中的葡萄糖和聚乙烯醇溶液中的氧之间就会发生如下的化学反应：

$$葡萄糖 + O_2 \rightarrow 葡萄糖酸内酯 + H_2O_2$$

通过在铂电极上外加电压可以使得上述化学反应中产生的 H_2O_2 发生电解，从而产生带正电的氢离子，并且这些氢离子还会流向铂电极。因此，血液样本中葡萄糖的浓度就可以通过测量两个电极间电流的方法得到。

生物传感器　生物传感器的工作原理取决于待检测的分析物与利用生物学方法衍生出来的生物分子之间的相互作用，这些生物分子包括某些特定形式的酶、抗体以及其他不同类型的蛋白质。这些生物分子可以附着在传感单元上，当它们和待检测的分析物相互作用时能够改变传感器的输出信号。图 2.3 显示了这类传感器的工作原理。给不同的传感单元(例如化学的和光学的传感单元，如图中右侧方框中所示)上选取合适的生物分子，就可以用来检测特定的分析物。对生物传感器更深入的描述还可以在专著[Buerk, 1993]中找到。

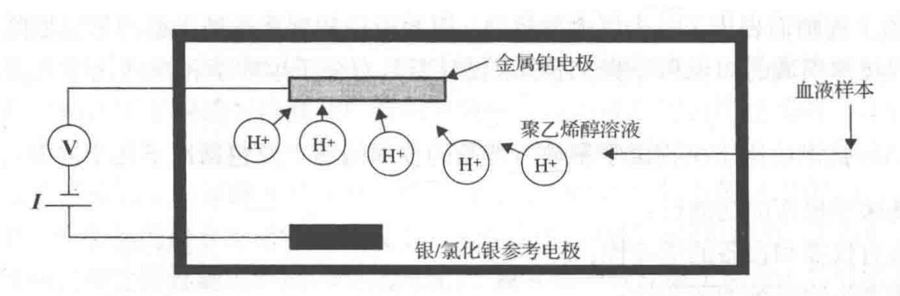


图2.2　测量葡萄糖浓度的生物医学传感器

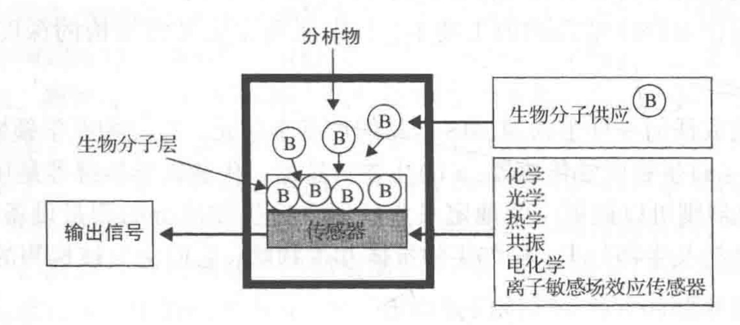


图2.3　生物传感器示意图

生物检测与分析系统　这些分析系统能够将生物样本中的不同成分进行分离，并且已经普遍应用于DNA序列测定工作。这些待检测的分析物包括各种不同的生物物质和人类基因组。对这些分析系统的操作涉及利用电液动力学的方法，例如电渗透原理和电泳法，来驱动毛细管或微管道中仅有纳升数量级的微量样品。电液动力学牵涉到利用外加的电场来驱动离子化的流体。对于这种形式的流体我们将在第3章中进一步介绍。之所以在毛细管或微管道中能够隔离并分离出各种不同的成分，是因为这些不同的成分各自具有其内在不同的电渗透流动性。一旦完成成分分离之后，就可以使用诸如荧光检测等光学方法来甄别这些不同的成分。通常，这些微型化的电液动力学系统还必须与实现信号转换、整形和处理的微电子电路制作在一起。我们可以把成百上千个这样的毛细管集成在一块芯片上来进行并行的检测分析。这种微型化的生物分析系统通常只需要非常微量的待检测样品，但是却仍然能够给出精确和几乎立等可取的结果。

图2.4所示为一个在生物检测与分析中使用的简单分析系统，它采用了一个毛细管电泳(CE)网络。该系统由两个直径在30微米左右的毛细管构成，也可以由两个类似尺寸的微管道组成。其中稍短的一个管道连接着注入样本储液器A和废弃待检物储液器A′，而另一个稍长的管道则连接着缓冲溶剂的储液器B和B′。某个生物样本中包含了S_1，S_2，S_3…等多种不同成分，它们各自具有不同的电渗透流动性。把该样本注入到储液器A中之后，在储液器A和A′之间施加一个电场就可以促使注入的样本由A流向A′。由于在两个管道的交叉位置处液体的流动会遇到更大的阻力，因此在此交叉位置处就会出现注入样本的聚集。此时再通过电路切换给储液器B和B′的两端施加一个高压电场，这样就可以驱使缓冲溶剂中聚集的样本从储液器B流向B′。由于样本中的各个不同成分具有各自不同的电渗透流动性，因此它们在这个电渗透流动的过程中就能够被分离开来。

上面的描述介绍了毛细管电泳分析系统的工作原理。正如还有很多其他类型的生物检测

与分析仪器及方法一样，显而易见，也还有很多其他类型的毛细管电泳(CE)分析系统，详细情况可以参考[Kovacs，1998]。

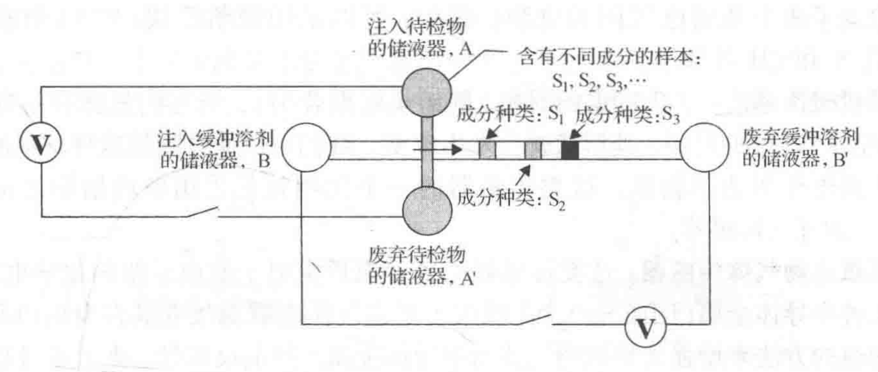


图 2.4　毛细管电泳系统示意图

2.2.3　化学传感器

化学传感器通常用来探测特定的化合物，例如各种不同的气体成分。事实上这类传感器的工作原理非常简单，正如我们在日常生活中经常看到的那样，很多物质都是对化学腐蚀作用十分敏感的。举例来说，大多数金属材料如果长时间暴露在空气中都有被氧化腐蚀的危险。在金属表面形成的一层氧化层能够改变金属材料的各种性能，例如金属的电阻。这种自然现象显示了设计和开发各类微化学传感器所依据的原理。可以肯定的是，从原理上说我们完全可以通过测量金属材料发生氧化反应后电阻值的改变来感知氧气的存在。当然这种通过化学传感器来探测氧气存在的方法，必须要比金属发生自然氧化的过程快得多，而且所需检测样品的实际大小也是在微尺度的范围。

材料对某些特定化学物质的敏感性已经被用作很多化学传感器的基本原理。下面给出的是 4 种值得一提的典型情况[Kovacs，1998]：

1. **如图 2.5 所示的化学电阻传感器**：把某些有机聚合物和嵌入的金属插入电极组合在一起，当这些有机聚合物暴露在某些特定的气体中时，就能够引起金属的电导率发生变化。例如，一种称作酞菁染料的特殊聚合物和铜电极组合在一起就可以用来检测氨(NH_3)和二氧化氮(NO_2)气体。

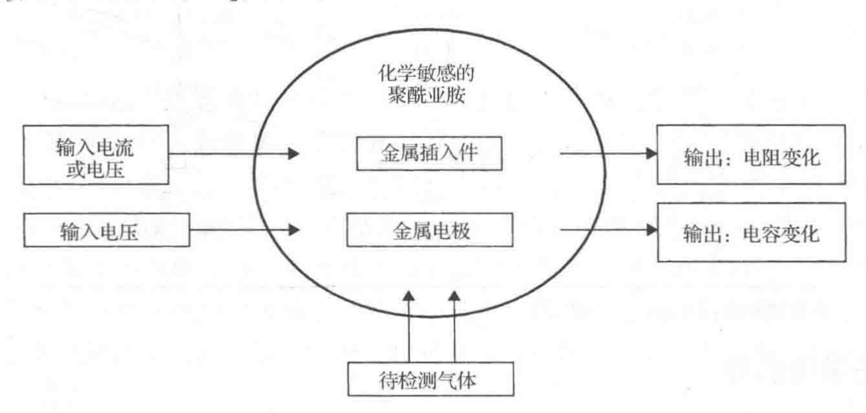


图 2.5　化学电阻传感器的工作原理

2. **同样如图2.5所示的化学电容传感器**：某些聚合物可以用作电容器中的电介质材料，当这些电介质材料暴露在某些特定的气体中时，它们的介电常数就会发生变化，这样就改变了两个金属电极间的电容。例如，可以采用聚苯乙炔(PPA)来检测如CO、CO_2、N_2和CH_4等气体。
3. **化学机械传感器**：某些特定的材料(例如某些聚合物)，当它们暴露在某些化学气氛(包括水汽)中的时候，其形状就会发生改变。我们可以通过测量这种材料的尺寸变化来探测这样的化学物质。这类传感器的一个实例就是采用玻璃增强聚酰亚胺(PI-2722)的湿度传感器。
4. **金属氧化物气体传感器**：这类传感器的工作原理类似于前面介绍的化学电阻传感器。有几种半导体金属(例如SnO_2)在吸收了某些气体之后会改变其自身的电阻，如果采用加热的方法来增强待检测的气体与半导体金属之间的反应性，则上述过程会变得更快。图2.6给出了一种基于半导体材料SnO_2的微传感器示意图[Kovacs, 1998]。

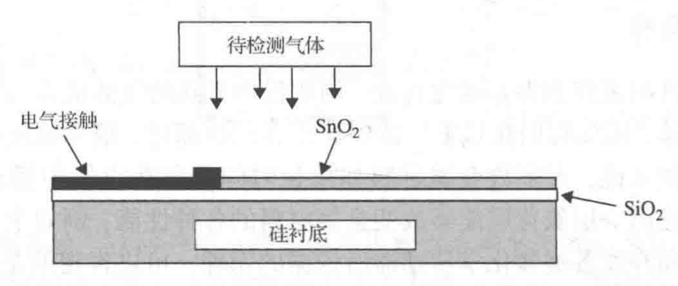


图2.6 典型的金属氧化物气体传感器(引自[Kovacs, 1998])

如果将一些金属催化剂沉积在传感器的表面还可以获得更好的结果。这样的沉积物能够加快反应速度，从而提高传感器的灵敏度。表2.1给出了一系列目前可获得的用于探测不同气体的金属氧化物传感器。

表2.1 有效的金属氧化物气体传感器

半导体金属	添加的催化剂	可探测的气体
$BaTiO_3/CuO$	La_2O_3, $CaCO_3$	CO_2
SnO_2	Pt + Sb	CO
SnO_2	Pt	乙醇
SnO_2	Sb_2O_3	H_2, O_2, H_2S
SnO_2	CuO	H_2S
ZnO	V, Mo	卤代烃
WO_3	Pt	NH_3
Fe_2O_3	Ti掺杂 + Au	CO
Ga_2O_3	Au	CO
MoO_3	无	NO_2, CO
In_2O_3	无	O_3

资料来源：[Kovacs, 1998]。

2.2.4 光学传感器

在量子物理学中，人们已经建立了非常完善的有关光线中的光子与受到光照射的固体中电子之间的相互作用原理。人们也已经开发了多种能够把光信号转变成电信号输出的器件，

并已经在大量消费产品(例如电视机)中获得应用。已经开发出了微光学传感器，可以用来测量光的强度。通常采用诸如 P 型或 N 型晶体硅这样的半导体材料来作为传感材料，因为它们能够提供很强的光子-电子相互作用。P 型晶体硅的原子中比其自然状态要缺少一个电子，而 N 型晶体硅的原子中则比其自然状态要多出一个电子。我们在第 3 章的 3.5 节中将会介绍，可以采用掺杂工艺来形成 P 型或 N 型晶体硅。图 2.7 展示了 4 种基本的光学传感器件[Kovacs, 1998]。

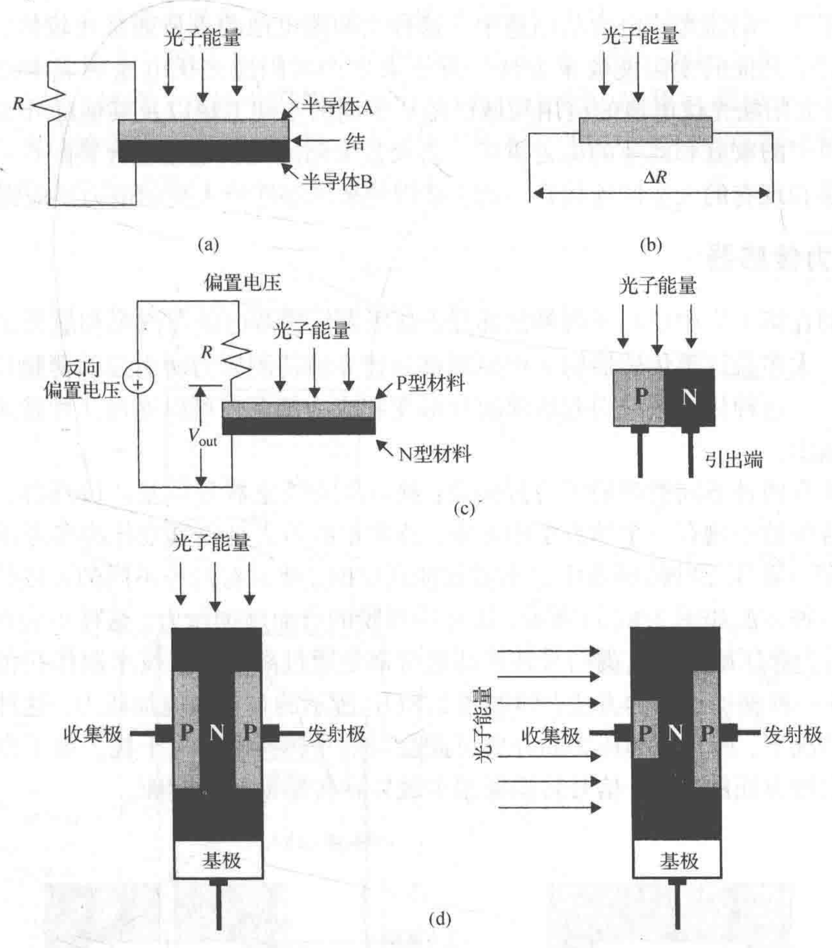


图 2.7　光学传感器件(引自[Kovacs, 1998])：(a)光伏结；(b)光电导器件；(c)光电二极管；(d)光电晶体管

如图 2.7(a)所示，当透光性较强的半导体衬底 A 受到入射光子能量的辐照之后，图中的光伏结上就会产生一个电势。由此产生的电压可以通过一个电桥电路中的电阻变化测量出来。图 2.7(b)展示了一种特殊的材料，它可以在受到光照的条件下改变其自身的电阻。图 2.7(c)所示的光电二极管是由 P 型掺杂和 N 型掺杂的两层半导体构成的，而图 2.7(d)所示的光电晶体管则由 P 型掺杂、N 型掺杂和 P 型掺杂的三层半导体构成。如上述图中所示，入射的光子能量能够被转换成电流从这些器件中输出。图 2.7 所示的各种器件在尺寸上都可以实现小型化，并且其产生输出电信号的响应时间也可以非常短。它们是实现各种微光学传感器的极好的备选结构。

我们将在第 12 章讨论量子物理方面的内容，这些内容将涉及如何把入射的光子能量转变为某些特定材料中电子的能量。

用于制作光学传感器的材料选择基本上是基于量子效率方面的考虑，即材料通过接收外部入射的光子来产生电子–空穴对(形成电信号输出)的能力。像硅和砷化镓这样一些半导体材料是制作光学传感器的常用材料。砷化镓具有更高的量子效率和更高的输出增益，但是其生产成本也更昂贵。碱金属材料，例如锂(Li)、钠(Na)、钾(K)、铷(Rb)也可以用来制作这类传感器，而最常用的碱金属材料则是铯(Cs)。

与图2.7(c)所示的结构类似，由硅晶圆片上的P型层和N型层组合结构引起的光伏效应已经被应用于太阳能光伏电池的制造中。这种太阳能电池的重量通常比较轻，而且其能量转换效率要高于其他的太阳能收集方法。近年来生产太阳能光伏电池的成本已经大大下降了，这就使得太阳能光伏电池的应用领域已经从早期的空间卫星以及其他的外太空飞船电力供应拓展到单个的家庭和商业的电力供应。将大量太阳能光伏电池组合装配在一起的太阳能光伏模块如果和现有的大电网连接在一起，必将越来越多地给人类的电力供应提供补充。

2.2.5 压力传感器

正如我们在第1章中已经了解到的那样，微压力传感器已经在汽车和航天工业中获得了广泛的应用。大多数这类传感器的工作原理都是建立在待测压力所引起的薄膜片机械形变与应力的基础上。这种机械效应引起的薄膜片形变和应力接下来可以通过几种转换方法将其转变成电信号输出。

一般说来有两种不同类型的压力传感器：绝对压力传感器和压差计传感器。绝对压力传感器在传感薄膜的一侧有一个抽真空的腔室，待测量的压力是以真空作为参考压力而得到的“绝对”压力值。在压差计传感器中是不需要抽真空的，此时有两种不同的方法给传感薄膜施加压力。第一种方法如图2.8(a)所示，从传感薄膜的背面施加压力，这样不会对信号转换器形成干扰，因为像压敏电阻这类信号转换器通常都是通过离子注入技术制作在传感薄膜的上表面的；另外一种施加压力的方法，即如图2.8(b)所示的在正面施加压力，这种方法只用在非常特殊的情况下，因为施加压力的介质可能会对信号转换器带来干扰。由于空间上的局限性以及互连引线方面的困难，信号转换器很少放置在传感薄膜的背面。

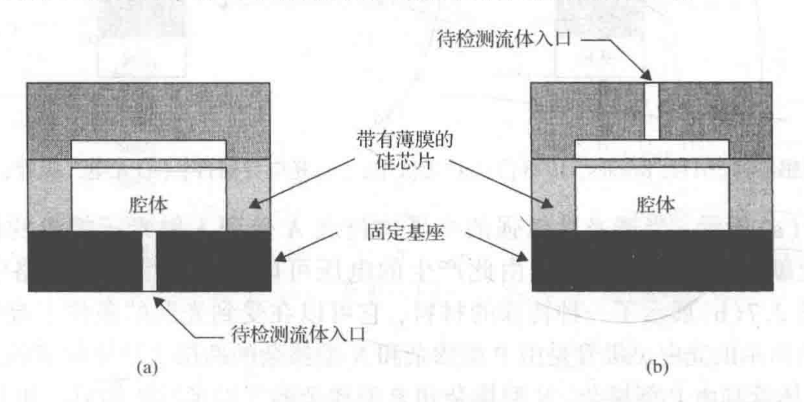


图2.8　典型的微压力传感器剖面图：(a)背面施压；(b)正面施压

如图2.8所示，传感元件通常由尺寸在几个微米到几个毫米见方的薄硅芯片构成。采用微加工技术在硅芯片的一面制备出一个空腔，空腔的顶部就形成了一个能在被测液体压力作用下变形的薄膜，硅薄膜的厚度通常在几个微米到几十个微米之间，由陶瓷或玻璃(通常采用的是一种称作派热克斯 Pyrex 材料的耐热玻璃)制作的固定底座支撑着这个硅芯片。外加

压力引起的薄膜形变可以通过不同的转换技术转变成电信号输出，这将在本节的后面进一步介绍。组装好的传感元件如图 2.8 所示，在完成合适的表面钝化处理后，它再和信号转换元件一起被封装到一个由金属、陶瓷或塑料做成的坚固外壳中。

图 2.9 给出了一个压力传感器的封装示意图，其中硅芯片的顶视图显示了采用离子注入技术在硅芯片表面形成的 4 个压敏电阻（R_1、R_2、R_3和 R_4），它们将外加压力在硅膜上引发的应力转换为其自身电阻的变化，然后再通过惠斯登电桥电路将电阻的变化转换成电压信号输出。这些压敏电阻从原理上说就是一种微型化的半导体应力计，它们可以把机械应力的改变转化成自身电阻的变化。如图 2.9 所示，压敏电阻 R_1和 R_3受到外加压力所引起的应力场作用，该应力场导致上述两个压敏电阻的阻值增大，而压敏电阻 R_2和 R_4则由于其取向的原因，其电阻值发生相反的变化。这些由外加的待测压力所引起的电阻变化可以通过惠斯登电桥电路以动态偏差的工作模式进行检测，其输出结果为：

$$V_{\mathrm{o}} = V_{\mathrm{in}}\left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) \tag{2.1}$$

其中，V_{o}和 V_{in}分别是惠斯登电桥电路的输出电压和外加电压。

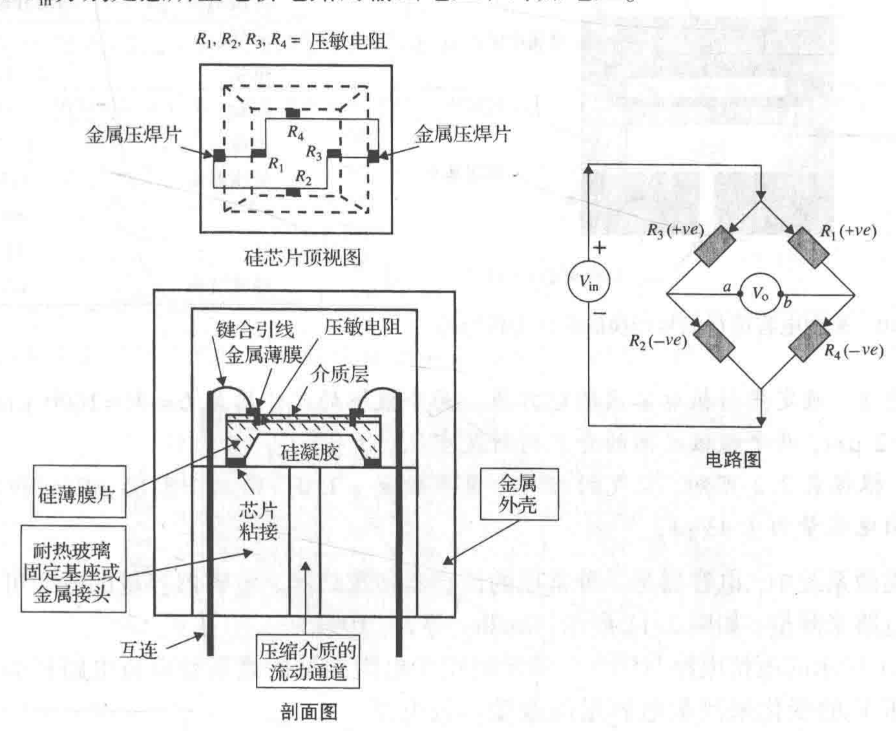


图 2.9　一个典型的微压力传感器的封装示意图

我们将在第 7 章中深入研究压电电阻材料的特性。正如图中的剖面图所示，利用细的压焊引线来连接两个金属焊盘和互连引脚，从而传导出来自压阻电桥的电压变化。图 1.2 左侧所示为一个已经封装好的这种类型的压力传感器。我们将在第 11 章中详细讨论这些压力传感器的封装技术。采用压电电阻的微型压力传感器具有较高的增益，且在平面内应力和输出电阻变化之间具有很好的线性关系。但是它也存在一个主要的缺点，就是对温度变化比较敏感。

微压力传感器中的信号转换方式可以依据其对传感器灵敏度和精度的要求有多种不同的

选择。另外人们还开发出了其他几种可用于微压力传感器的信号转换方式，我们接下来将介绍其中的两种。

图2.10展示了一个利用电容的变化来进行压力测量的微压力传感器，它采用分别附着在上盖底部和敏感薄膜顶部的两个薄金属片作为电容的两个电极，由外部所施加压力引起敏感薄膜的任何变形都会使两个电极之间的间距变窄，从而导致两个电极之间电容的变化，该方法的优点是与工作温度相对无关。这种平行板电容器的电容量 C 与两极板之间距离 d 的关系可表示为：

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.2}$$

式中，ε_r是绝缘介质的相对介电常数，ε_0是自由空间(即真空)的介电常数，$\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m (pF = 皮法 = 10^{-12}法拉)。

表2.2给出了几种常见物质的相对介电常数。

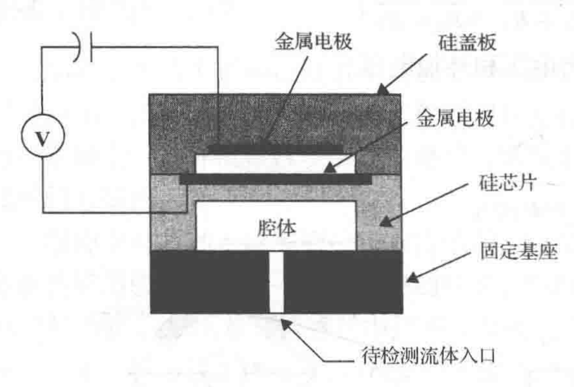


图2.10　采用电容进行信号转换的微压力传感器

表2.2　某些介质材料的相对介电常数 ε_r

介质材料	相对介电常数
空气	1.0
纸张	2～3.5
陶瓷	6～7
云母	3～7
变压器油	4.5
水	80
硅	12
硼硅玻璃	4.7

例题2.1　确定平行板电容器的电容值。两个极板的尺寸均为 $L = W = 1000\ \mu\text{m}$，电极间距离为 $d = 2\ \mu\text{m}$，两个极板之间的介质材料是空气。

解答：根据表2.2可知，空气的相对介电常数 $\varepsilon_r = 1.0$。由 $\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m 和式(2.2)，可以计算出电容量为4.43 pF。

在各类微系统中，电容器是一种常用的传感器和致动器。电容器容量的改变可以通过一些简单的电路来测量，如图2.11所示[Bradley 等人，1991]。

图2.11所示的电桥电路与图2.9所示的用于电阻测量的惠斯登电桥电路相似。可以通过输出电压 V_o的变化来测量电容量的改变。该电路中电容量的变化可以通过下面的公式求出：

$$V_o = \frac{\Delta C}{2(2C + \Delta C)} V_{in} \tag{2.3}$$

式中，ΔC 是微压力传感器中的电容改变量，C 是电路中的其他电容值，电桥电路上施加了一个恒定的电压源信号 V_{in}。

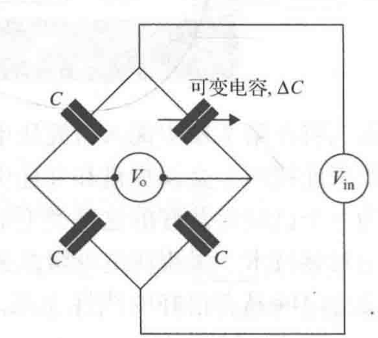


图2.11　用于电容测量的典型电桥电路

图2.12所示为用于汽车上歧管绝对压力(MAP)测量的传感器示意图[Chiou，1999]。该传感器采用

一个电容器作为信号转换器，其中的硅芯片在压力腔中的安装细节和图 1.22(c)所示的情况类似。

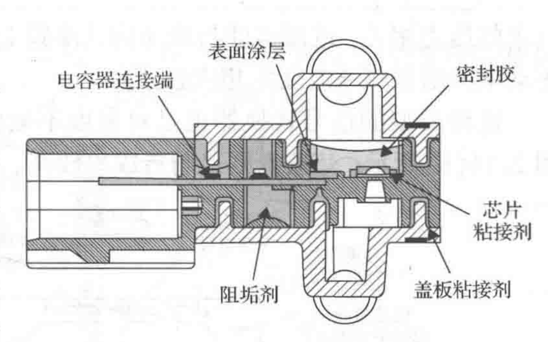


图 2.12　采用电容器作为信号转换器的歧管绝对压力传感器（经摩托罗拉公司许可使用）

采用电容器作为信号转换器的微压力传感器还是没有采用压敏电阻元件作为信号转换器的微压力传感器的灵敏度高，但是它也不像压敏电阻元件那样对工作温度那么敏感。另一方面，我们也应该认识到电容式压力传感器存在的一个主要缺点，即电桥电路输出电压的变化量与外界压力变化引起的电容变化量之间并不成线性关系。这种非线性的输入/输出关系已经由式(2.3)给出。下面的例题将进一步展示这种非线性关系。

例题 2.2　计算图 2.11 所示的电桥电路的输出电压，其中的平行板电容器及其两个平板电极的间隙变化如例题 2.1 所述。

解答： 应用式(2.2)和式(2.3)可以建立如下的电压输出表：

电极间隙 d(μm)	电容量 C(pF)	电容改变量 ΔC(pF)	电压比率(V_o/V_{in})
2.00	4.425	0	0
1.75	5.057	0.632	0.029
1.50	5.900	1.475	0.056
1.00	8.850	4.425	0.100
0.75	11.800	7.375	0.119
0.50	17.700	13.275	0.136

图 2.13 展示了电极间隙 d 的改变与电容变化量之间的非线性关系。

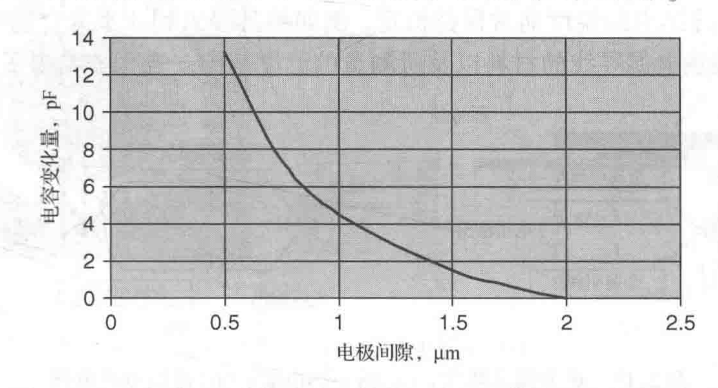


图 2.13　一个采用电容作为信号转换器的压力传感器的非线性输出

图 2.14(a)展示了一个采用振动梁作为信号转换器的微压力传感器结构[Petersen 等人，1991]。在跨越硅芯片上表面浅腔的两侧安置一个薄的 N 型硅梁，在 N 型硅梁的下方通过扩散工艺在浅腔表面制备出一个 P 型电极。P 型电极和 N 型硅梁分别采用硼掺杂和磷掺杂，我们将在第 3 章中对这种掺杂工艺进行详细介绍。无论 P 型掺杂还是 N 型掺杂的硅材料都是可以导电的。在对硅薄膜施加压力之前，首先通过在 P 型掺杂的扩散电极上施加一个交流信号促使硅梁以其谐振频率发生振动。施加到硅薄膜(和硅芯片)上的应力将被传递到振动梁上，沿着梁的方向的应力将会使得梁的谐振频率发生改变。梁的谐振频率的改变可以与传递

过来的压力相关，进而也就与施加到硅薄膜上的压力相关。我们将在第 4 章中给出计算上述振动梁的谐振频率改变的相应公式。

这种类型的信号转换器也是对温度不敏感的，而且能够给出很好的线性输出信号，如图 2.14(b)所示，其缺点则是制造成本较高。

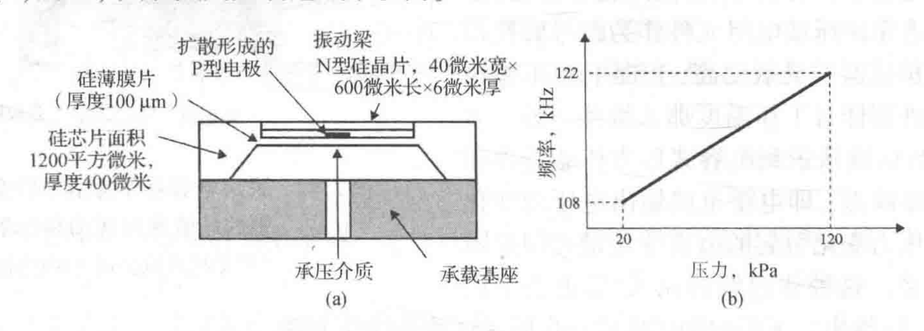


图 2.14　采用振动梁作为信号转换器的微压力传感器：(a)压力敏感单元；(b)已经报道的灵敏度

2.2.6　热传感器

热电偶是最常用的一种热传感器，其工作原理是：将两个由不同金属材料构成的导线连接在一起，当两个导线的连接点(称为结点)受到加热时，就会在这两个不同金属线的开路端产生一个电动势[如图 2.15(a)所示]。由于加热的作用使得结点的温度升高，这个温升与其产生的电动势或电压的幅度相关。我们可以把这些金属导线及其结点做成非常小的尺寸。如图 2.15(b)所示，在上述热电偶电路中再增加一个结点，并将其置于不同于第一个结点的温度上，这时就会在电路内部形成一个温度梯度。这种由冷热两个结点构成的热电偶能够产生所谓的塞贝克效应，该效应是由 T. J. Seebeck 在 1821 年首次发现的。由热电偶产生的电压可以利用公式 $V=\beta\Delta T$ 进行计算，其中 β 是塞贝克系数，ΔT 是热结点与冷结点之间的温度差。事实上，冷结点的温度通常保持恒定，例如将其浸入到冰水混合物中使其保持 0℃。系数 β 取决于构成热电偶导线的材料以及所测量的温度范围。表 2.3 给出了一些常见热电偶的塞贝克系数。

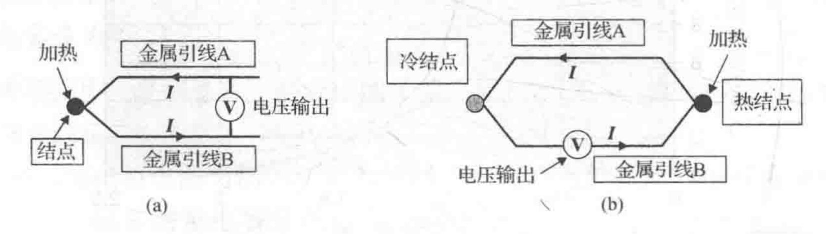


图 2.15　热电偶示意图：(a)单一热电偶；(b)双结点热电偶

表 2.3　常用热电偶的塞贝克系数

类型	导线材料	塞贝克系数(μV/℃)	温度范围(℃)	电压范围(mV)
E	铬镍/康铜	0℃时 58.70	-270 ~ 1000	-9.84 ~ 76.36
J	铁/康铜	0℃时 50.37	-210 ~ 1200	-8.10 ~ 69.54
K	铬镍/镍铝	0℃时 39.48	-270 ~ 1372	-6.55 ~ 54.87
R	铂(10%)-铑/铂	600℃时 10.19	-50 ~ 1768	-0.24 ~ 18.70
T	铜/康铜	0℃时 38.74	-270 ~ 400	-6.26 ~ 20.87
S	铂(13%)-铑/铂	600℃时 11.35	-50 ~ 1768	-0.23 ~ 21.11

资料来源：[Kreith, 1998]。

基于热电偶原理的微型温度传感器的一个严重缺点是其输出信号的幅度会随着导线及其结点尺寸的减小而降低，因此单个热电偶本身并不是理想的微型温度传感器。

微热电堆是实现小型化热传感的一个更为实际的解决方案。热电堆工作时同样也有热结点和冷结点，但是它们的组成方式是将各个热电偶相互并联，而电压输出采用串联形式，图 2.16 展示了热电堆的这种组成方式。热电堆中使用的导线材料和热电偶是一样的，也是铜/康铜（T 型）以及铬镍/镍铝（K 型）等材料，如表 2.3 所示。

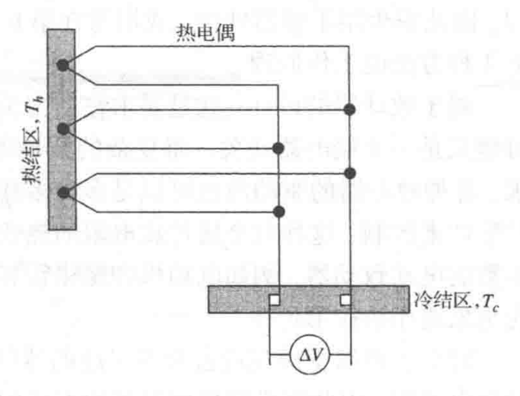


图 2.16　热电堆的组成示意图

由热电堆产生的输出电压可以通过下面的公式求得：

$$\Delta V = N\beta\Delta T \tag{2.4}$$

式中，N 为热电堆中所包含的热电偶对的个数；β 为两种热电偶材料之间的热电势（即塞贝克系数），其单位是 V/K（参见表 2.3）；ΔT 为热电偶两端的温度差，单位是 K。

Choi 和 Wise 在 1986 年研制出了一个微型热电堆，如图 2.17 所示［Choi 和 Wise，1986］。该热电堆中包含了 32 个由多晶硅-金构成的热电偶。制造这个热电堆的硅芯片尺寸仅为 3.6 mm×3.6 mm×20 μm。利用一个温度为 500 K 的黑体辐射源，在 Q_{in} =0.29 mW/cm^{2}的条件下该热电堆可以产生 100 mV 的典型输出信号，其响应时间为 50 ms 左右。

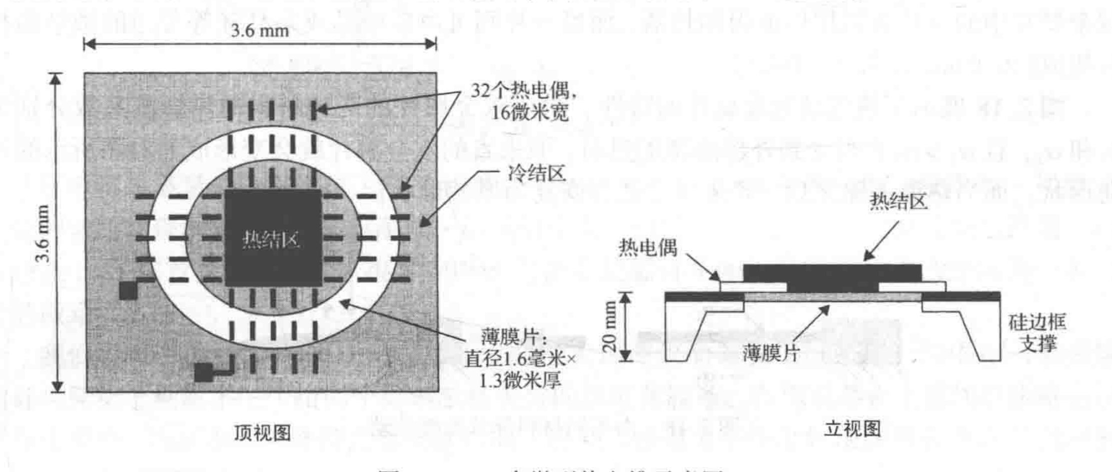


图 2.17　一个微型热电堆示意图

与图 2.10 类似的压力传感器也可以用来测量工作介质的温度。在这种情况下，硅薄膜的形变则是由热源引起的，而不是像在压力传感器中那样是由压力引起的。引起硅薄膜变形的热应力最终可以与电极发生形变的电容建立相关性。但是如果要求更高的灵敏度，则还是需要采用热电堆或热电偶来制作敏感元件。

2.3　微致动

韦伯斯特词典［Mish，1995］对“致动器”（actuator）的定义是“用来移动或控制某个物体的机械部件”。致动器在涉及运动的微系统里是一个非常重要的组成部分。通常用来驱动微器

件运动的4个主要手段为：(1)热力；(2)形状记忆合金；(3)压电晶体；(4)静电力。电磁致动器广泛应用于宏观尺度的大型设备和机器中，但是由于它不能适应不断按比例小型化的规律，因此很少用于微器件中，我们将在第6章中对此做进一步的说明。本节中将主要讨论以上4种方法的工作原理。

对于致动器的设计，就是要求在动力源的驱动下能够完成所需要的动作。简单的致动器可能只是一个继电器开关，而复杂的致动器则可能是一个喷墨打印头。根据不同的应用要求，各种致动器的驱动源也可以是多种多样的。一个电路中的开关可以用通过电流的双金属片形变来控制，这种双金属片在电阻的热效应作用下会产生形变来驱动开关。另一方面，大多数的电动致动器，例如电动机和螺线管装置，都是靠电磁感应现象来驱动的，这种电磁感应现象遵循法拉第定律。

对于各种属于微观或者介观尺度的器件来说，几乎没有空间来安装电磁感应装置所需要的导电线圈，因此就必须要研究其他方式的驱动力。接下来将介绍微致动领域中常用的3种动力源。

2.3.1　利用热力的致动

双金属片就是一种基于热力驱动的致动器，它由两片具有不同热膨胀系数的金属片粘合在一起所构成，当由初始的参考温度开始对其进行加热或冷却时，由于两种材料的热膨胀系数不同，双金属片就会发生弯曲。一旦外加的热源消失，双金属片又会恢复到原来的形状。这种致动原理已经运用于诸如微夹钳或微阀门等几种不同的微致动器中。在这些应用场合，双金属片中的一片金属用作电阻加热器，而另一片则可由硅单晶或多晶硅等普通的微结构材料构成[Riethmuller等人，1987]。

图2.18展示了热致动双金属片的特性。构成双金属片的两种材料的热膨胀系数分别为α_1和α_2，且$\alpha_1 > \alpha_2$。当受到外部热源加热时，原来直的双金属片就会变形成如右图所示的弯曲形状。而当热源去除之后，双金属片就会恢复为原始形状。

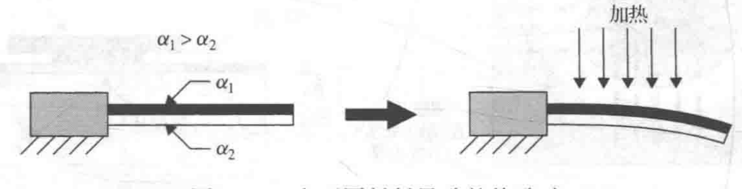


图2.18　由不同材料导致的热致动

2.3.2　利用形状记忆合金的致动

利用诸如镍钛合金这样一类的具有形状记忆特性的合金材料可以制造出更加精确和更为高效的微型致动装置，这种形状记忆合金(SMA)在预置的温度下具有恢复到原来形状的能力。我们可以用图2.19来说明采用形状记忆合金的微致动器的工作原理。首先将一个形状记忆合金片粘附到一个硅悬臂梁上，该形状记忆合金片在所设计的预置温度T时是处于原始的弯曲状态，而硅悬臂梁在室温时则是直的。当我们把硅悬臂梁以及粘附于其上的形状记忆合金片加热到温度T时，就会唤醒形状记忆合金片的“记忆”，从而使其恢复到原来的弯曲形状。合金片的弯曲将迫使与其粘附在一起的硅悬臂梁同时发生形变，最终达到硅悬臂梁的微

致动效果。这种类型的致动方式已经被广泛应用于微型旋转致动器、微型关节与机器人以及微弹簧上[Gabriel 等人，1988]。

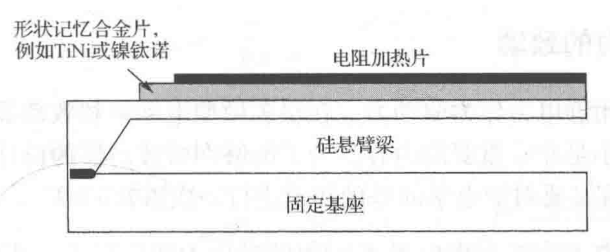


图 2.19　利用形状记忆合金的微致动

2.3.3　利用压电效应的致动

自然界中存在的某些晶体材料，例如石英晶体，在外加电压的作用下会产生形变；反过来也一样，当晶体材料在外力的作用下发生形变时，也会在晶体材料的两端产生电压。这种现象称作压电效应，如图 2.20 所示。

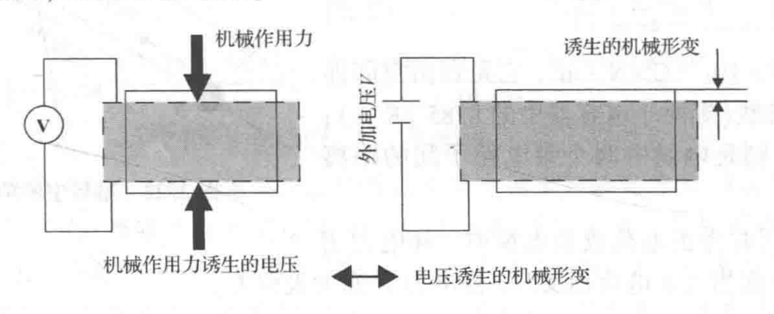


图 2.20　压电效应

压电特性最早是由皮埃尔·居里和雅克·居里兄弟在 1880 年发现的，皮埃尔·居里是一位著名的物理学家，也就是玛丽亚·居里的丈夫。而"压电特性"这个词则是威尔海姆·汉克尔在 1881 年首次提出的。在很多 MEMS 与微系统器件中，压电特性目前已经成为一种主要的微致动方法。

我们参照图 2.21 所示来说明利用压电特性实现微致动器的工作原理。图中在一根弹性的硅悬臂梁上粘附了一个由两个导电电极夹持的压电薄膜条。在压电晶体上施加电压将会使其发生形变，进而引起弹性硅悬臂梁的弯曲。已经有报道关于压电致动原理在微定位机制和微型夹具等领域的应用[Higuchi 等人，1990]。

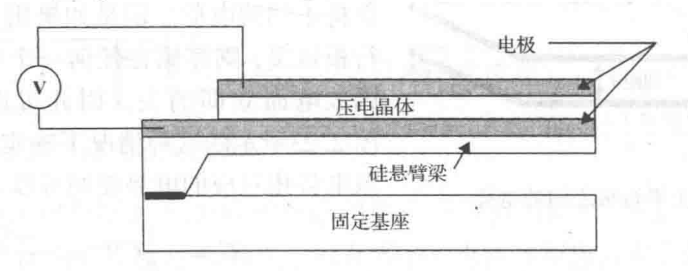


图 2.21　采用压电晶体的致动器

压电晶体材料是微致动器中使用的基本材料。有关常用压电晶体材料的晶体结构以及确定晶体材料各种机电特性的数学公式等更多信息，我们将在第7章中给出。

2.3.4　利用静电力的致动

许多致动器都利用静电力作为驱动力。在很多微型电动机和致动器的设计工作中，准确地估算出静电力的大小是非常重要的内容。为了能够在微致动器的设计中有效地利用这种重要的动力源，我们很有必要对静电学的基础知识进行一次重新回顾。

库仑定律　静电力 F 定义为由电场 E 引起的排斥力或吸引力。正如我们在物理课中所学到的，在正电荷和负电荷之间存在电场 E。查尔斯·奥古斯丁·库仑(1736—1806年)最早发现了这种现象并得出了计算两个带电粒子之间作用力 F 大小的数学公式。

如图2.22所示，假设两个带电粒子A和B位于它们各自产生的电场中，根据库仑定律，它们之间的静电力为：

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2} \tag{2.5}$$

式中，$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ C^2/N\cdot m^2$，它是自由空间即真空中的介电常数(等同于电容器中的8.85 pF/m)；式(2.5)中的 r 则是电场中两个带电粒子间的距离矢量。

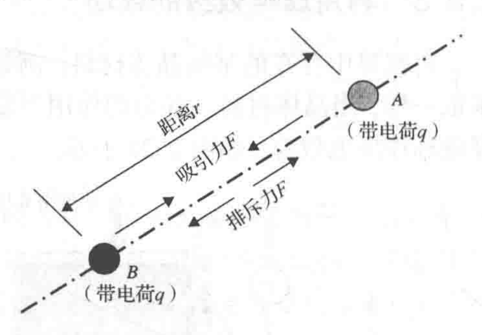


图2.22　电场中的两个粒子

当 q 和 q' 同时为正电荷或负电荷时，静电力 F 表现为排斥力；而当二者电荷相反时，静电力 F 变为吸引力。

平行板之间的静电力　图2.23展示了一个由介质材料(也就是电绝缘材料)隔开的两块带电平板，其间距为 d。当给两块平板之间施加一个电动势或电压时，平板就会被充电，这个充电过程就说明两块带电的平板之间具有一定的电容，该电容可以表示为：

$$C = \varepsilon_r\varepsilon_0\frac{A}{d} = \varepsilon_r\varepsilon_0\frac{WL}{d} \tag{2.6}$$

式中，A 是平板的面积；ε_r 是介质材料的相对介电常数。表2.2给出了一些常见介质材料的相对介电常数 ε_r。

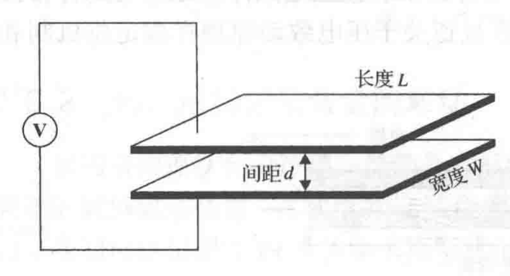


图2.23　两个平行板之间的电势

不难设想，只要施加在系统上的电压一直维持下去，图2.23中的上下两块平行板上就会一直保持不同的电荷。但是如果用一个导体将两个平行板短接，则存储在任何一个平板上的电荷都会因放电而立即消失。因此可以得出结论，即在图2.23所示的这种情况下确实存在着电势，而与该电势相对应的电势能则可以表示为：

$$U = -\frac{1}{2}CV^2 = -\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 WLV^2}{2d} \tag{2.7}$$

上述计算电势能的公式前面有一个负号，这是因为当外加电压升高时，电势能会减小。

与之相关联的垂直于平板的法向静电力(即沿着 d 的方向)则可以通过电势能的式(2.7)推导出来：

$$F_d = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 WLV^2}{d^2} \tag{2.8}$$

例题2.3　如图2.24所示，一个平行板电容器是由尺寸 $L = W = 1000\ \mu m$(或1 mm)的两块方板组成的。当两个极板之间的间距为 $d = 2\ \mu m$ 时，求法向静电力。隔开两个平行板电极的介质材料是静止的空气，它允许两个极板之间的间距 d 毫无阻碍地发生微小的变化。

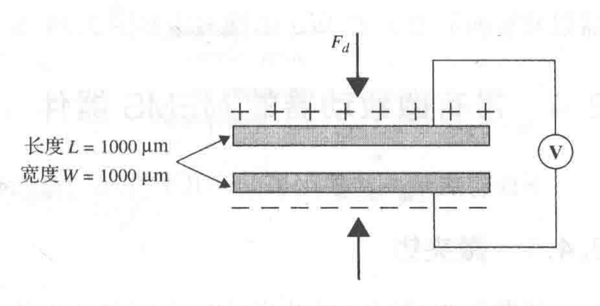


图2.24　平行板电容器中的法向静电力

解答：作用在平板上的法向静电力可以利用式(2.8)计算出来，其中空气为绝缘介质，其相对介电常数为 $\varepsilon_r = 1.0$，真空中的介电常数为 $\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m 或 $8.85\times10^{-12}\ C^2/N\cdot m^2$，由此得到：

$$F_d = -\frac{1.0\times(8.85\times10^{-12})(1000\times10^{-6})(1000\times10^{-6})V^2}{2\times(2\times10^{-6})^2}$$

$$= -1.106\times10^{-6}V^2 \quad 牛顿(N)$$

因此，当在两块之间施加100 V电压时，作用在平板电极上的静电力为11 mN(毫牛顿)。

由式(2.8)还可以推导出沿着宽度 W 和长度 L 方向作用在平板电极的静电力的表达式，这两个方向的作用力是当平板电极在相应的方向上发生局部偏移时而感应出来的[Trimmer和Gabriel, 1987]。下面给出的是式(2.8)的一个通用形式，可以用来计算上述作用力。

$$F_i = -\frac{\partial U}{\partial x_i} \tag{2.9}$$

式中，下标 i 代表发生偏移的方向，例如沿着宽度 W 的方向或长度 L 的方向。式(2.9)中的负号表示平板电极沿着 x 方向相对运动的任何一点增加，都会导致平板电极之间相对重叠面积的减小，而这将进一步引起电势能函数 U 的下降。

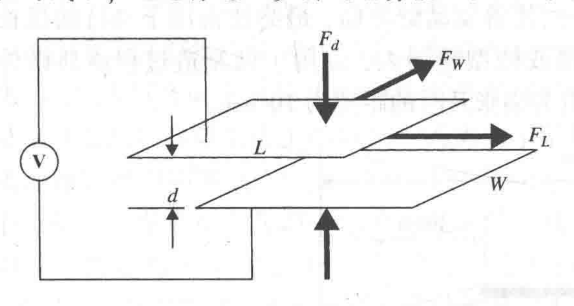


图2.25　作用在平行板电极上的静电力

因此，根据图2.25中指定的作用力方向，可以写出沿着上述两个方向上的静电力的表达式：

$$F_W = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 LV^2}{d} \tag{2.10}$$

沿着长度方向：

$$F_L = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 WV^2}{d} \tag{2.11}$$

式(2.8)中的法向作用力 F_d 也同样可以利用式(2.9)的偏微分方法导出。式(2.10)和式(2.11)给出的平面内的静电力 F_W 和 F_L，只有当平板电极在相应方向上发生偏移时才存在，也就是说，只有当平板电极在宽度方向上发生偏移时，静电力 F_W 才存在。从上面两个表达式还可以看到，F_W 与宽度 W 无关；同样，F_L 与长度 L 无关。

这些静电力是微马达中用到的主要驱动力，我们将在接下来的 2.4 节 ~2.6 节展示的微器件中进一步介绍。采用直流电源的静电力可以用来驱动微夹钳中的梳状推动杆，而采用交流电源的静电力则可以用来驱动谐振腔中的梳状推动杆。采用静电力驱动的缺点是通过这种方式获得的力通常都是很小的，因此它的应用领域主要局限在如图 1.12 所示的光开关致动器以及下面的图 2.27 所示的微夹钳和图 2.39 所示的谐振腔器件中。

2.4　带有微致动器的 MEMS 器件

下面将展示一些采用了前面几节介绍的微致动原理研制出的微器件。

2.4.1　微夹钳

如图 2.26 所示，带电的平行金属板产生的静电力，可以用来作为夹持物体的驱动力。正如从图中所看到的，一个夹钳中所需的夹持力既可以由两个平板电极之间的法向力来提供[如图 2.26(a)所示]，也可以由发生偏移的一对平板电极平面内的力来提供[如图 2.26(b)所示]。

图 2.26(a)所示的由平板电极的法向静电力提供夹持力的方法，看起来在实际应用中似乎很简单，但这种方法的一个主要缺点就是电极在微夹钳结构中占用了过多的空间，因此这种方法现在已经很少使用。而另一种采用多对交错电极产生静电力的方法则在微器件中获得了广泛的应用，这种方法经常被称为梳状驱动。梳状驱动可以用来产生声波，如图 2.1 所示，也可以用来设计微夹钳，如图 2.27 所示[Kim 等人，1991]。夹钳尖端的夹持动作是通过在与驱动臂和闭合臂相连的平板电极上施加一个电压来启动的。这些交错电极对之间产生的静电力趋向于使这些平板电极对准，从而使得驱动臂弯曲，最终使得用于夹持的延长臂闭合。这些微夹钳可以用来装备微型操纵器或微型机器人，以用于微制造过程或显微外科。Kim 等人制作的夹钳长度为 400 μm，夹钳尖端张开时的距离为 10 μm。

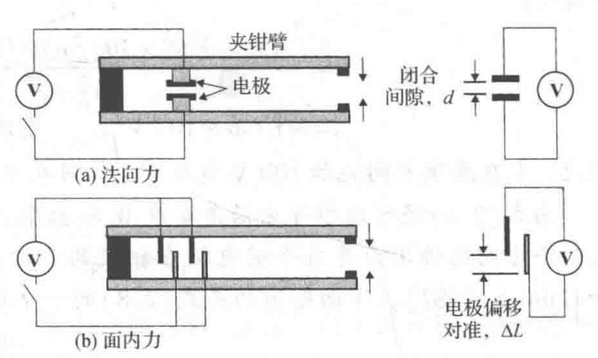


图 2.26　微夹钳中的夹持力

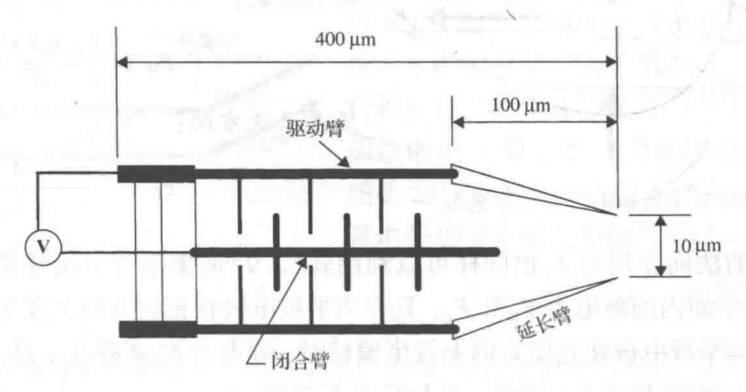


图 2.27　微夹钳示意图

例题2.4　对于如图2.28所示的梳状驱动的致动器，要使电极通过拉伸弹簧移动10 μm，计算出所需的外加电压。弹簧的弹性系数 $k=0.05$ N/m。梳状驱动器工作在空气中，电极之间的间隙为 $d=2$ μm，电极宽度为 $W=5$ μm。

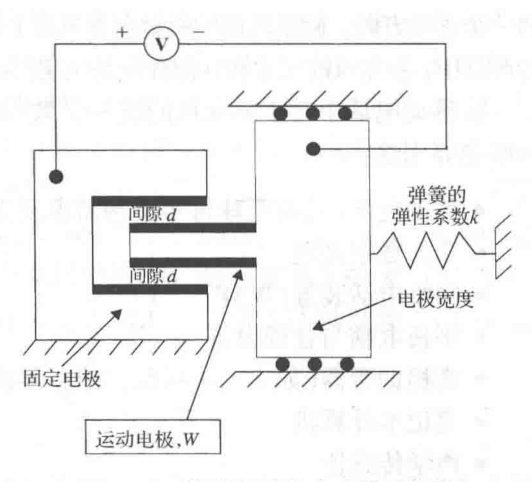


图2.28　梳状驱动的致动器示意图

解答：要求电极移动的距离为 $\delta=10\times10^{-6}$ m，对应需要克服的弹簧弹力为 $F=k\delta=0.05$ N/m $\times 10\times10^{-6}$ m $=0.5\times10^{-6}$ N。

该系统中存在两组电极（一共包含4个指状电极），每组电极（即一对指状电极）需要产生的静电力为 0.5 F $=0.25\times10^{-6}$ N。将 $\varepsilon_r=1.0$，$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$ C/N·m^2，$W=5\times10^{-6}$ m，$d=2\times10^{-6}$ m 代入式(2.11)，可以得到求解所需外加电压 V 的方程如下：

$$0.25\times10^{-6}=\frac{1}{2}\frac{1\times8.85\times10^{-12}\times5\times10^{-6}}{2\times10^{-6}}V^2$$

求解上述方程，可得到所需的外加电压为 $V=150.33$ V。

对于微型梳状驱动器来说，需要外加150.33 V的电压通常显得还是太高了。降低驱动电压的一个有效措施是采用多组电极结构。采用与例题2.4中求解方法类似的计算步骤，可以获得外加电压随着电极数目的增加而急剧下降的关系，如图2.29所示。从图中可见，当电极数目增加到113组（即包含114个指状电极）时，即可将所需的外加电压由150.33 V降低到20 V。

2.4.2　微型麦克风

麦克风是感知声音的传感器，我们在无线电收音机、电视机以及电话通信中听到的声音都能够体现出麦克风在我们日常生活中的应用。人类为了能够听到遥远处的声音所做的努力一直可以追溯到几百年以前。第一个在工程上获得应用的麦克风要归功于亚历山大·格雷姆·贝尔在1876年的发明专利[Eargle，2004]。从那时以来，人类一直在设计和制造出更好的麦克风方面做出不懈的努力。

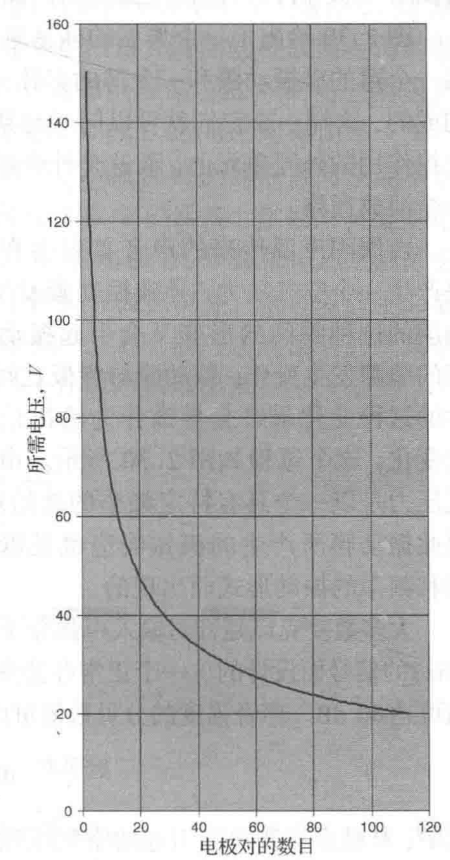


图2.29　一个梳状驱动器所需电压与电极数目之间的关系

由于麦克风在医疗保健领域应用的迅速增长，特别是在助听器以及信息技术领域中的小型化便携式计算机和移动通信设备中的应用增长，麦克风的微型化研究目前已经成了许多工程师和科学家为之努力奋斗

的一个主要方向。微米尺度的微型麦克风是上述这些产品中的基本元件。在助听器以及移动电话等产品中，麦克风的尺寸和性能往往是决定其能否实现产业化和成功进入市场的关键因素。

在移动电话中对于麦克风的进一步微型化要求仍然是非常强烈的，微型麦克风具有以下一些主要用途：

- 移动电话(目前全球每年市场需求量为2亿部)
- 个人数字助理
- 网络电话装置(WAP)
- 平板电脑与音频设备
- 高档助听器(如表1.4所示，2002年需求量为700万部)
- 笔记本计算机
- 声学传感器
- 消费类电子产品，玩具
- 智能家用电器

2004年全球市场对微型麦克风的需求量是5000万只，这一数字到2008年会增加到3亿5000万只。

这些麦克风的典型封装尺寸为1 mm × 1 mm × 0.5 mm左右，它们都是采用聚合物材料[Hsieh等人，1997]或硅单晶材料[Hsu等人，1998]制造的。

图2.30给出了一个典型的硅基电容式麦克风的核心单元结构，其中的主要组成部件包括一个薄的硅振动膜和一个薄的多孔背板。上述振动膜和背板通常都是由导电的多晶硅材料构成的，这样一来它们就可以同时起到电容器电极的作用。这两个部件的边缘固定在一个起支撑作用的外壳单元上，而这个外壳则既给背板下方提供了一个腔体，又为压力平衡提供了一个泄放通路。

由周围声源传来的声音首先会在薄的振动膜上产生一个空气压力，导致振动膜发生形变，而振动膜的这种瞬间的形变又会引起振动膜与背板之间的缝隙发生变化，振动膜与背板之间的缝隙所发生的这种变化最终会导致作为输出信号的电容发生变化，这个过程如图2.30所示。由于输入的空气压力是以一个具有特定频率的波的形式出现的，因此振动膜所产生的机械响应也是以具有一定振幅和频率的振动形式而出现的。

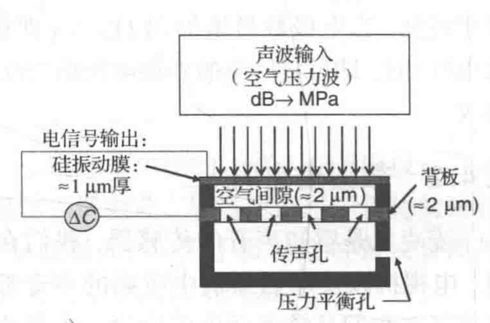


图2.30　一个微型麦克风的核心单元

大多数麦克风是针对输入声强介于20～80分贝(dB)、输入声音频率介于150～1000赫兹(Hz)的信号而设计的。一个正常办公室中的噪声强度为50 dB，而一个嘈杂的办公环境的噪声强可达80 dB。声音强度的分贝数值可以利用下面的表达式转换成空气的压力[Eargle，2004]：

$$\mathrm{dB} = 20\ \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right) \tag{2.12}$$

式中，P是由待测声音引起的空气压强，其单位是帕斯卡，P_0是频率为1000 Hz、声强达到人耳听觉阈值(即0 dB)的声波的参考压强。

尽管微型麦克风和压力传感器(如图2.8所示)在核心部件的组成上具有一定的相似性，

但是微型麦克风在信号处理方面的要求要比压力传感器复杂得多，这是因为在微型麦克风中为了实现声音信号的清晰传输必须要求具有较高的信噪比[Pedersen 等人, 1998]。因此很多微型麦克风采用压阻材料而不是采用电容来制作信号发生器[Arnold 等人, 2001; Papila 等人, 2003]，因为压阻材料具有较高的灵敏度，并且在输出电信号与输入的声波信号之间具有较好的线性关系，这一点在 2.2.5 节中已经做了介绍。

在利用风洞开展的各类空气动力学测试试验[Arnold 等人, 2003]以及一些智能助听器[Chowdhury 等人, 2002]中，则经常要用到微型麦克风的阵列，而不是单个的麦克风器件。这些应用领域则要求更为复杂的信号处理技术，有关这方面的进一步论述可以参考[Johnson 和 Dudgeon, 1993]。

2.4.3 微型电动机

目前在各类微机械中应用的微型电动机(也称为微马达)有两种类型：直线电动机和旋转电动机。

微型电动机的驱动力主要是静电力。如图 2.25 所示，在直线电动机中，给相互偏移的电极对之间施加电压就会产生滑动力，从而导致所要求的相对运动。图 2.31 显示了在两组由不可压缩的光滑介质材料(例如石英薄膜)隔开的平行基板之间产生线性运动的原理，在上述每一组基板上都包含一系列的导电极板。所有这些电极的长度都是 W，下基板的电极间距是 W，而上基板的电极间距则稍有一点不同，其电极间距为 $W + W/3$。如图 2.31 所示，两组基板初始时偏移了 $W/3$ 的距离。我们将下面的基板固定，这样就可以使上面的基板在水平面上相对下基板滑动。因此当给电极对 A 和 A′施加电压时，就会驱动上基板向左移动，直至电极对 A 和 A′完全对齐重合为止。此时电极对 B 和 B′之间也同样偏移了 $W/3$ 的距离，我们可以再给这一对偏移的电极 B 和 B′施加电压，从而使得上基板再向左侧移动 $W/3$ 的距离。我们可以设想一下此时电极对 C 和 C′也会偏移 $W/3$ 的距离，然后对其施加电压同样会使上基板再向左侧移动 $W/3$ 的距离。直到给最后一对电极 D、D′施加电压之后才会终止上基板的运动。因此只要仔细设计上、下两组基板上的电极及其间距，就可以产生必要的静电力以驱动上、下两组基板之间的相对运动。不难看到，上下电极对之间偏移的距离越小，基板的运动就越平稳。旋转电动机也可以按照类似的工作原理制造出来。

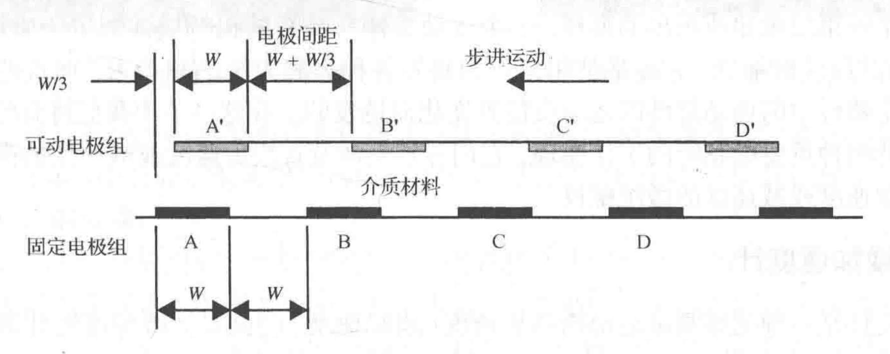


图 2.31 静电驱动的微型电动机工作原理

有关这类电动机的详细设计过程在一篇文章中已经给出[Trimmer, 1997]。微型电动机设计和制造中的一个主要问题就是转子的轴承，目前已经采用电磁悬浮原理来解决这个问题[Kumar 和 Cho, 1991]。

建立在静电力驱动原理上的微型电动机技术已经有很多人对其进行了详细的介绍，包括[Fan 等人，1988]、[Mehregany 等人，1990]和[Gabriel 等人，1988]，而用于生产这类电动机的制造技术则由[Lober 和 Howe，1988]对其进行了讨论。

如图 1.10 所示，利用静电力驱动的旋转电动机可以采用与直线电动机相类似的结构来制造。图 2.32 给出了一个静电力驱动的微型电动机的顶视图。从图中可以看到，所有的电极都安装在转子电极体的外表面和定子电极体的内表面上。与直线电动机类似，转子电极体和定子电极体上的电极间隔也是相互偏移的，这样就可以通过在转子和定子上相互偏移的电极对之间施加电压来产生静电驱动力。读者将会注意到定子电极体和转子电极体的数目之比为 3:2。转子电极体和定子电极体之间的空气间隙可以小到 2 μm。定子电极体的外直径在 100 μm 左右，而转子电极体的长度只有 20 ~25 μm。

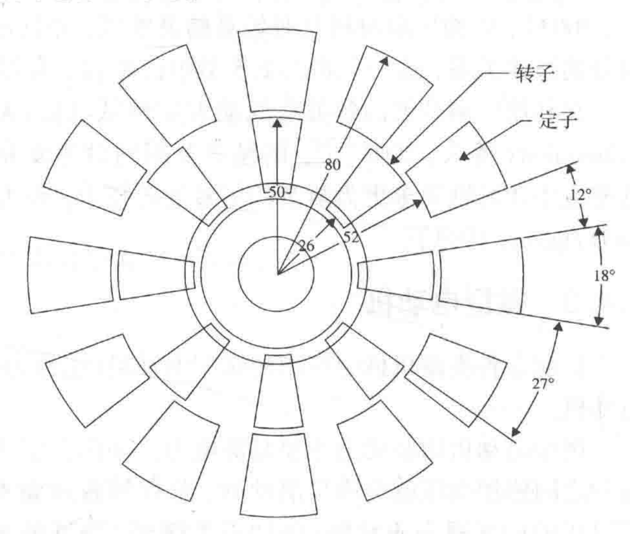


图 2.32 微型旋转电动机的结构示意图

工程师们在设计和制造微型旋转电动机的过程中所遇到的一个严重问题就是轴承的磨损和润滑。在典型情况下，这些电动机一般会以 10 000 转/分钟(rpm)以上的转速旋转。在这样高的转速下，轴承很快就会发生磨损，其结果就是导致转子的晃动。解决这个问题需要付出很大的努力。因此解决摩擦、磨损和润滑问题的微摩擦学就成为微技术研究中的关键研究领域。[Zum Gahr，1993]给出了一个有关微摩擦学这个重要研究课题的详细介绍。

2.5 具有机械惯性的微致动器

正如牛顿第二定律所指出的那样，一个运动物体所具有的机械惯性力等于其加速度(或减速度)与其质量的乘积，它经常被用来作为感知各种力和力矩的驱动力，而这些力和力矩则是由某个器件中的可动部件的运动或位置变化而诱发的。在这一节中我们将介绍基于上述机理制造的两种重要微系统的工作原理，它们分别是涉及直线加速度或减速度的微加速度计和涉及角加速度或减速度的微陀螺仪。

2.5.1 微加速度计

加速度计是一种能够测量运动物体加速度(或减速度)的仪器。微加速度计通常是用来探测与运动中的机械系统相关的一些动态力。正如第 1 章介绍的那样，这类加速度计广泛应用于汽车工业中。例如，量程为 ±2g 的加速度传感器应用于汽车的悬架系统和防抱死制动系统(ABS)中，而量程为 ±50g 的加速度传感器则用于当汽车与其他交通工具或障碍物发

生碰撞时启动保护驾驶员和乘客安全的气囊展开系统。符号 g 代表重力加速度，其数值为 32 ft/s² 或 9.81 m/s²。我们在这里用独立的一节来介绍微加速度计，因为这类器件经常被划分为惯性传感器，尽管其内部实际包含有致动元件。

大多数加速度计都是利用机械振动原理制作的，这一点将在第 4 章中详细介绍。加速度计中的主要元件是一个由弹簧支撑的质量块，该质量块通常与一个阻尼减震器连接在一起，后者可以提供必要的阻尼效应。弹簧和阻尼减震器再分别连接到外壳上，如图 2.33 所示。

对于微加速度计来说，由于微器件中可用的空间非常有限，因此必须对其内部结构的安排做出重大的调整。一个微硅梁和一个附在其上的质量块（通常称之为检测质量）就构成了一个弹簧-质量块系统，而周围的空气则被用来产生阻尼效应。支撑质量块的结构就起到了弹簧的作用。图 2.34 给出了一个典型的微加速度计的结构示意图，其中，质量块附着在当作弹簧使用的悬臂梁或平板上。该悬臂梁或平板上嵌入了一个压敏电阻来测量由粘附在其上的质量块所引起的形变，由此可在其与振动质量块的振幅以及加速度之间建立起相关性。第 4 章中给出了有关振动质量块与壳体加速度之间关系的数学公式。由于加速度（或减速度）与引起物体振动的动态驱动力有关，而振动的物体又与壳体安装在一起，因此精确地测量出加速度就可以使得工程师们能够测得所施加的动态力。因此我们不难理解为什么微加速度计被广泛用于汽车发生碰撞事故时触发气囊展开系统的启动器，也不难理解为什么微加速度计被广泛用于探测车辆底盘悬架系统的过量振动。

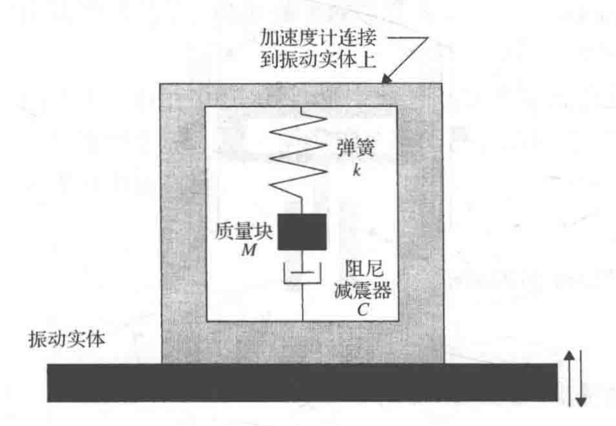



图 2.33　一个加速度计的典型配置

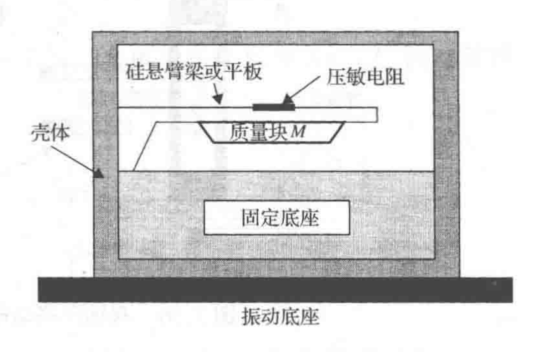


图 2.34　微加速度计的结构示意图

目前已经有多种不同类型的商业化加速度计可供使用，微加速度计中采用的信号转换器包括压电、压阻、电容和谐振器等[Madou，1997]。我们将在第 11 章中详细介绍这些不同类型信号转换器的原理。

目前市场上广泛应用的一种微加速度计（或者称之为惯性传感器）是用于汽车气囊展开系统的集成微加速度计。如图 1.6 和图 1.8 所示，这类器件中集成了信号转换器和相应的电子电路，其中的传感元件，也就是加速度计，包含一个特殊的结构，如图 2.35 所示，我们将在下面介绍这种微加速度计的工作原理。

参见图 2.35(a)，一根细横梁的两端与两个链状弹簧框架相连，链状弹簧框架由弹性材料制成并且其另一端固定。这根细梁起的就是检测质量的作用，其上附有一个电极板，该电极板位于两个固定的电极之间。当该单元承受一定的加速度作用时，上述检测质量就会朝着

与加速度相反的方向移动，如图 2.35(b)和图 2.35(c)所示。由加速度(或减速度)所引起的检测质量的移动可以与该结构中两对电极之间的电容变化建立相关性。

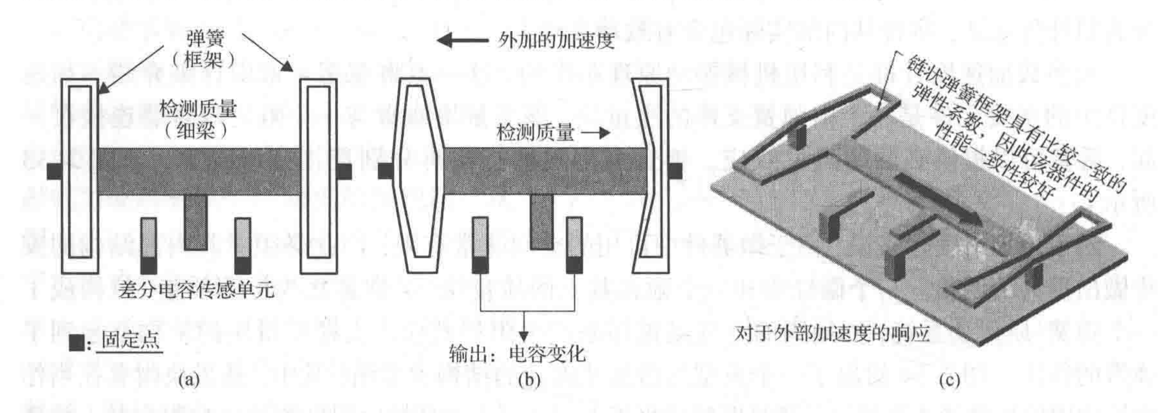


图 2.35　微型惯性传感器的结构示意图：(a)处于平衡条件下；(b)具有向左的加速度；(c)一个检测质量以向左的加速度运动(引自文献[Doscher,1999])

我们可以看到检测质量的移动方向与该传感单元所承受的加速度或减速度方向相反。图 2.35 所示的传感单元结构只能测量出沿着检测质量长度方向上的加速度。当我们把两个传感单元安装在同一个基座上时，如图 2.36 所示的设计方案则可以测量出沿着 x、y 两个方向上的加速度。

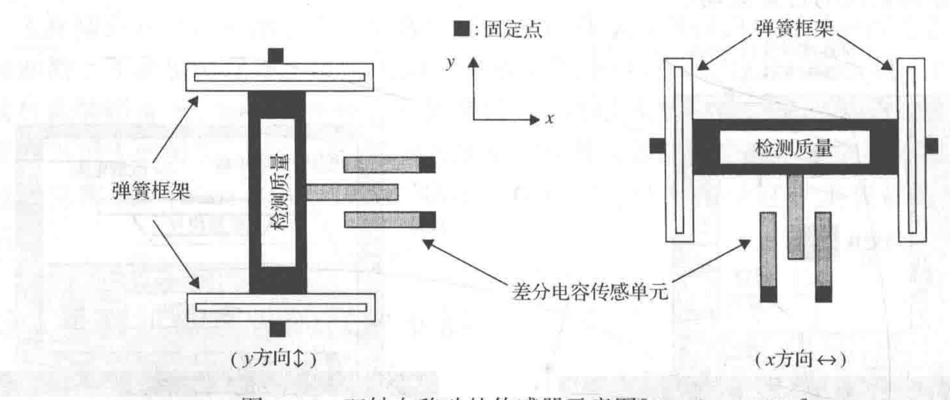


图 2.36　双轴向移动的传感器示意图[Doscher, 1999]

图 2.37 所示为一个更加紧凑的加速度传感器设计结构，其中的检测质量由一个可以在 x 和 y 两个方向上进行位移的方形平板取代。该传感器的电气与机械设计原理在相关的参考文献[Doscher, 1999; Chau 等人, 1995]中已有介绍。

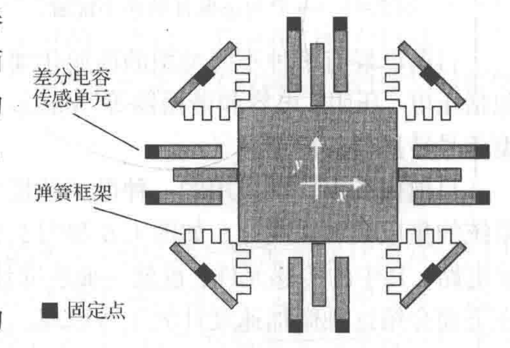


图 2.37　一个紧凑结构的双轴运动传感器示意图(经位于Norwood, MA的Analog Devices公司许可使用)

2.5.2　微陀螺仪

陀螺仪是一种可以用于测量角度旋转速率的器件，该器件广泛应用于各类飞机、宇宙飞船、导弹、汽车以及大量的消费类电子产品中。微陀螺仪则是将陀螺仪与电信号转换器封装在一起形成的

微型化器件，这类器件的尺寸范围可以从几个微米直到一个厘米。由于微陀螺仪具有体积超小、重量极轻的优点，这就使得它特别适合于应用在长距离、低功耗的微小卫星、微型飞行器中。一个宇航员身上穿戴的衣服中可能就包含有多个这样的微陀螺仪，这些微陀螺仪可以用于宇航员在太空中行走时的定位和活动监测。在赛格威(Segway)公司推出的两轮自平衡电动车中，使用微陀螺仪的硅传感系统就是其中的关键控制元件(参见 http://www.baesystems.com/newsroom/2002/jul/220702news8.htm)。

目前有3种不同类型的陀螺仪：旋转型、光学型和振动型。旋转型微陀螺仪在设计上与传统的陀螺仪类似，它的典型结构包含一个旋转质量块，其旋转轴由一个万向支架支撑，而该万向支架则固定在一个陀螺框架上。由于这种设计结构中涉及到高速旋转的部件，因此这种类型的微陀螺仪通常要求一个几乎无摩擦的轴承，这就给设计带来了很大的复杂性，同时也大大提高了制造成本。光学型微陀螺仪的精度是最高的，但是由于其体积过大，并且生产成本也较高，因此这种类型的微陀螺仪在工业界的应用并不十分普遍。振动型微陀螺仪，或者称之为音叉型微陀螺仪，则是目前工业界最常使用的一种微陀螺仪，因为它适合采用批量制造工艺来生产，并且也具有最低的结构复杂度。

振动型微陀螺仪的工作过程是基于科里奥利效应原理，也就是基于科里奥利加速度。对于一个沿着参考坐标轴(x)方向以速度 V 运动的固体质量块来说，当它在 x-y 平面内以角速度 $\mathbf{\Omega}$ 做旋转运动时，就会在正交的坐标轴(y)方向上引起一个科里奥利加速度 a_c。利用牛顿第二运动定律，就可以得到与之相关的科里奥利力为 $F_c = ma_c$，其中 m 是运动固体的质量。在这种情况下，科里奥利加速度为 $\mathbf{a}_c = 2\mathbf{V}\times\mathbf{\Omega}$，由此可以得到科里奥利力为：

$$\mathbf{F}_c = 2m\mathbf{V}\times\mathbf{\Omega} \tag{2.13}$$

图2.38对式(2.13)给出的矢量表达式做了形象化的展示。

在图2.38中，x 坐标轴是质量块运动的方向，z 坐标轴是固体的旋转轴，y 坐标轴则是科里奥利力的方向。

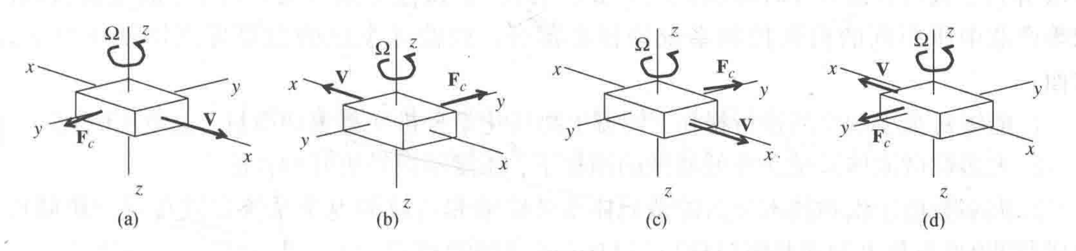


图2.38　一个直线运动的固体在旋转中所产生的科里奥利力

从式(2.13)中可以看到，根据质量块的运动速度 V，以及测得的科里奥利力 $\mathbf{F}_c$，我们就可以计算出运动固体的旋转角速度 $\mathbf{\Omega}$。

对于微陀螺仪来说，由于受到极小的可用空间的限制，必须采取一些特殊的设计措施，才能满足固体质量块具有较高线速度的要求，以及精确测量出低速旋转的陀螺框架所引起的科里奥利力。图2.39展示了一个典型的振动型微陀螺仪的核心结构。

图2.39给出了一个振动型(或音叉型)微陀螺仪结构的顶视图，其中 x 和 y 两个方向的坐标轴与图2.38所示的坐标轴是完全一致的。该结构的核心单元由一个检测质量块构成，它在 y 方向上通过两个链状弹簧与一个悬空的框架相连接，而悬空的框架又通过梳状驱动的谐振腔以及4个 x 方向的弹簧与整个陀螺仪的框架相连接，如图所示。

梳状驱动的谐振器使得检测质量块可以沿着 x 坐标轴的正、反两个方向做直线运动，如图2.38所示的4种情形。当整个陀螺仪的框架发生微小的转动时，就会引起振动的质量块发生相应的转动，由此产生科里奥利效应，并根据检测质量块旋转方向的不同，分别在 y 坐标轴的正反向或反方向产生科里奥利力，如图2.38所示。利用 y 方向位置电容传感器可以测量链状弹簧的形变，再根据链状弹簧的等效弹性系数，就可以确定所产生的科里奥利力的大小。通过 x 和 y 两个方向的位置电容传感器，还可以进一步测量出转动的幅度以及转动的速率。

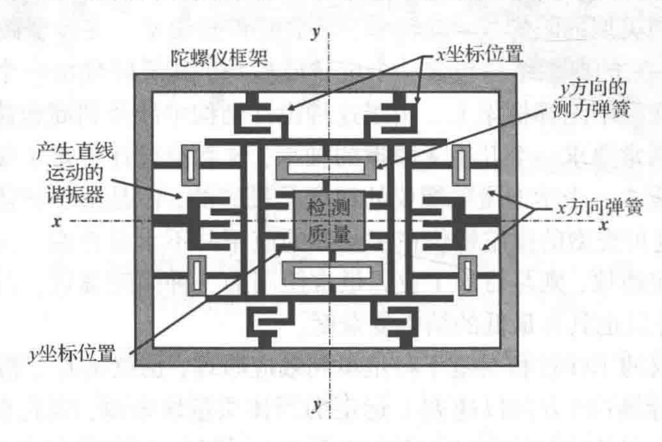


图2.39　一个音叉型微陀螺仪的结构顶视示意图

2.6　微流体器件

微流体系统目前广泛应用于生物医学、精密制造过程以及制药工业等领域。微流体系统的主要应用包括：化学分析、生物与化学传感、药物输送、DNA分析中的分子分离、扩增、DNA排序、核酸合成以及环境监测[Kovacs, 1998]。微流体器件也是汽车、航空航天以及机床等产业中所用到的精密控制系统的核心部分。微流体系统的主要优点体现在以下几个方面：

1. 能够对很少的样品进行操作，使得生物与化学分析变得更加微量，也更加便宜。

2. 大多数微流体系统在降低能耗的前提下，还能够提供更好的性能。

3. 大多数用于生物技术分析的微流体系统能够和传统的电子系统集成在同一块硅片上，构成所谓的“芯片上的实验室(LOC)”[Lipman, 1999]。

4. 由于大量的这类系统是批量化生产的，因此它们都是一次性使用的，这样就保证了应用中的安全性，并省去了清洁和维护的费用。

一个微流体系统通常由一些尺寸介于微观与介观尺度的喷嘴、泵、管道、蓄水池、混合器、振荡器以及阀门等组成。Henning从另外一个稍有区别的角度定义了微流体系统的范畴[Henning, 1998]。依据他给出的定义，一个流体系统包含以下几个主要组成部分：

1. 用于测量流体特性(如压力、温度、流量等)的微型传感器。这类传感器中的大多数都是基于2.2节中所介绍的工作原理而制造出来的。

2. 用于改变流体状态的致动器。微型阀的工作原理将在2.6.1节中予以介绍，微型泵及压缩机的工作原理将在2.6.2节中予以介绍。

3. 用于调节系统中各分支流量的分送管道。如图2.4所示的毛细管网络在微流体系统

中是非常普遍的。在许多微流体系统中使用了如图 2.40 所示的几种非圆形截面的微管道，它们通常具有平方微米量级的敞开的横截面，这种微管道输送的流量从几百纳升到几个微升。我们将在第 10 章详细介绍，非圆形截面的微管道通常是采用化学腐蚀的方法在敞开的管道中制成的，将两个敞开的管道粘合在一起就可以构成一个封闭的导管，如图 2.40(a)、(b)和(c)所示，而图 2.40(d)、(e)和(f)所示的导管则是将化学腐蚀得到的敞开管道与平整的玻璃板粘合在一起形成的。这些制造出的管道长度可以小于 1 mm。图 2.40(e)所示的 V 形管道通常应用于微型热管中，以便耗散那些发热的电子元器件在微小空间中所产生的热量。

由生物检测与分析系统中的电渗透或电泳现象所提供的电液驱动力(参见 2.2.2 节)已经被广泛地应用于驱动微量流体样品在微管道中的流动。我们将在第 3 章中介绍电液动力学的工作原理。

4. 包括了通过微管道连接起来的微传感器、微型阀以及微型泵在内的整个系统集成。该系统集成中还包括所需的能够提供电液驱动力学的电气系统、能够进行电信号转换和处理的电路系统以及能够控制微流体流动的控制系统。

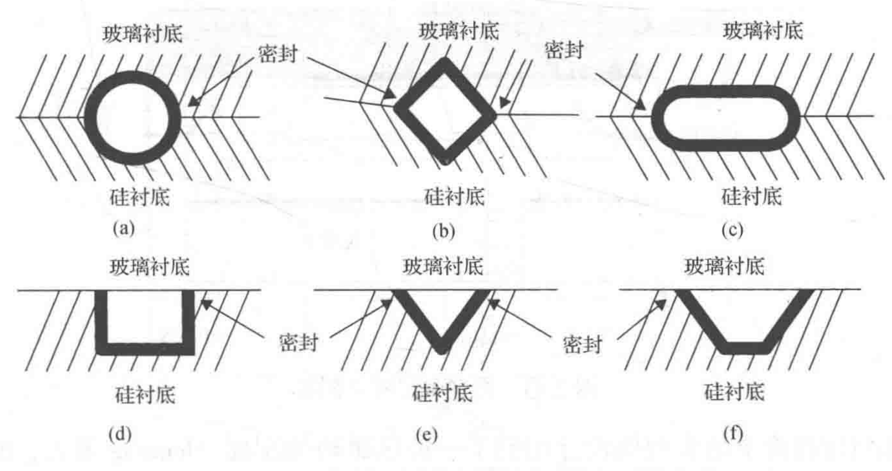


图 2.40　非圆形截面的微管道：(a)圆形管道；(b)菱形管道；(c)长圆形管道；(d)矩形管道；(e)V形管道；(f)梯形管道

微流体系统可以采用诸如石英、玻璃、塑料、有机聚合物、陶瓷、半导体以及金属等各种不同类型的材料来制造。我们将在 2.6.1 节和 2.6.2 节中分别介绍微型阀和微型泵的工作原理。正如我们在第 6 章中将要介绍的按比例缩小定律所指出的那样，这类系统的设计需要给予一些特别的考虑。当整个系统的尺寸按比例缩小之后，其表面积与质量之比将发生剧烈的变化。例如，由于流体在微细管道中流过时会产生众所周知的毛细管效应，因此表面张力和黏滞性就成为了流体系统设计中两个主要的控制因素。采用电液驱动力的抽吸作用是在微管道中驱动流体流动的一个有效的方法，这一点将在 3.8.2 节中予以介绍。那个用于流体动力学分析的著名的 Navier-Stokes 方程(将在 5.5 节中予以介绍)也不再适用于微系统中流体流动的动力学特性分析与预测[Pfahler 等人，1990]。经过修正的微管道流动理论分析公式将在第 5 章讲解微流体动力学时予以介绍，同时我们还将在第 10 章中给出一个实际的设计案例。

2.6.1 微型阀

微型阀主要应用于那些要求对制造过程中的气体流量进行精密控制的工业系统中，或者在生物医学领域中用于控制动脉中的血液流量。微型阀的一个不断增长的市场需求是在制药工业中，在这里微型阀是用于进行药物成分的精确分析与分离的微流体系统中的主要元件。微型阀的工作原理与微致动器基本相同。Jerman 报道了一个早期的微型阀设计[Jerman, 1991]，如图 2.41 所示，利用贴在薄膜顶部的两个环状电阻的加热可以使得薄膜产生一个向下的运动从而关闭流体的通道。当薄膜上的热量散去后则又可以重新打开阀门，从而允许流体的流动。在 Jerman 设计的微型阀中，薄膜的直径是 2.5 mm，其厚度是 10 μm，加热环由 5 μm厚的铝膜构成，该微型阀在流体压强达到 100 psi 时的流量为 300 cm^3/min；在 25 psig 压强下关闭该微型阀所需要的功耗为 1.5 W。有关这种类型微型阀的详细设计过程与性能指标可以在 Jerman 的论文[Jerman, 1990]中找到。Pourahmadi 等人在其论文中描述了另一种类型的采用电磁螺线管驱动抽吸作用的微型阀[Pourahmadi 等人, 1990]。

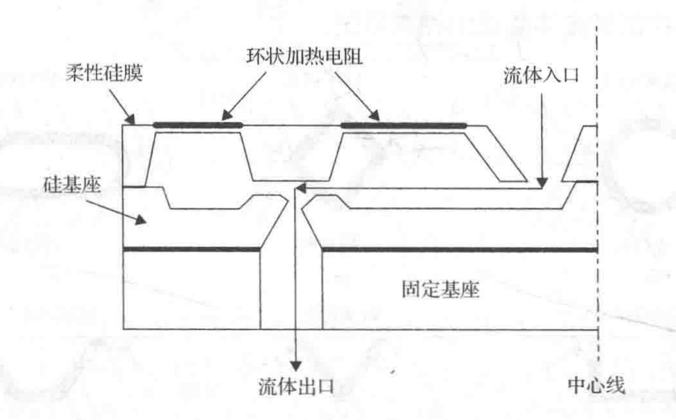


图 2.41　微型阀结构示意图

一个相对比较简单的微型阀设计用到了一种热驱动的原理[Henning 等人, 1997; Henning, 1998]，这种类型微型阀的剖面结构如图 2.42 所示，该微型阀的设计可以控制其中的流速从一种常开的状态(如图中所示)到完全关闭的状态。改变硅薄膜向下弯曲的程度就可以调节微型阀开启的大小，而硅薄膜的弯曲则是依靠加热其上面封闭腔体中的一种特殊液体来驱动的。在这种情况下，热源则是贴在该装置顶部的电阻薄片。

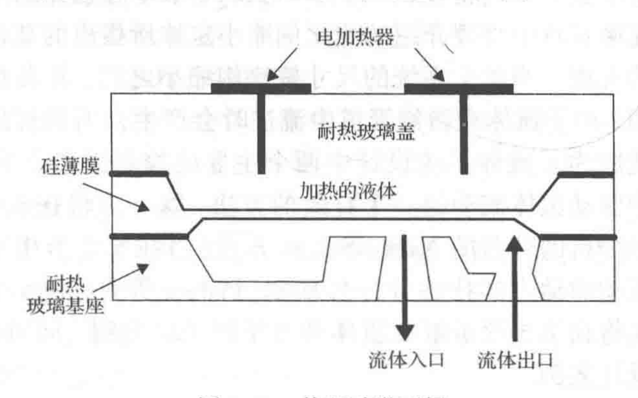


图 2.42　热驱动微型阀

2.6.2 微型泵

一个简单的微型泵可以利用静电驱动的薄膜来构成，如图 2.43 所示，可发生形变的硅薄膜构成了一个电容器中的一个电极，通过在电极之间施加电压可以驱使该硅薄膜向着上电极的方向发生形变。这层硅膜向上的运动就会增大泵腔的体积，因而也就减小了腔中的压力。而压力的减小则会导致输入端口的单向阀开启，使得液体得以吸入。接下来当切断电极上的外加电压后，就可以使硅膜回到原始的位置，这样就导致泵腔的体积缩小，从而增大泵腔中储存溶液的压力。当泵腔中储存溶液的压力达到某个设计指标时，输出端口的单向阀就会开启，从而使液体排出，由此完成一个微型泵的完整工作过程。Zengerle 等人报道了这种微型泵器件的设计[Zengerle 等人，1992]。图 2.43 所示的微型泵是方形的，其硅薄膜的尺寸为 4 mm × 4 mm × 25 μm，硅薄膜与电极之间的间隙是 4 μm。驱动电压的频率介于 1 ~ 100 Hz 之间，当驱动电压的频率为 25 Hz 时，可获得 70 μL/min 的流量。

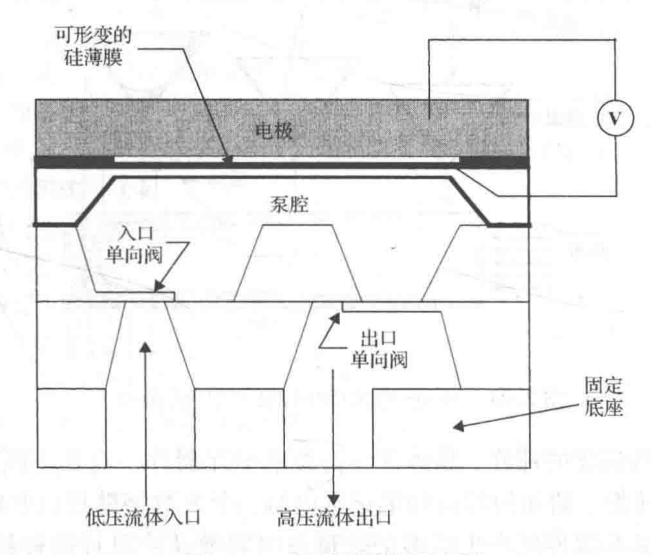


图 2.43 微型泵结构示意图

另外一种类型的微型泵称为压电泵[Madou，1997]，它是利用流体流过柔性微管道时在其柔性壁上产生波动的原理制成的。将压电材料涂敷在管壁外使其产生波动，管壁发生波动就会向其中流过的流体施加压力，从而形成所需要的运动。我们将在第 5 章中详细介绍这种类型微型泵的工作原理。

2.6.3 微型热管

热管是一种能够以较小的表面积和较低的温差传导大量热量的器件，一个典型的热管就是一个内壁覆盖了一层芯吸材料的圆管，典型的芯吸材料是一种疏松的、包含有大量的微小孔隙、能够使得液体发生毛细管流动的材料。我们将在第 5 章中介绍流体的毛细管流动现象。热管的一端与热源相接触，另一端与热沉相接触。热管上介于热源与热沉之间的部分是与外部绝热的。由热源提供的热量使得与其相邻部位热管中的液体发生汽化蒸发并向热沉一端流动，当蒸气在热沉处耗散掉热量后其温度将下降，因而又凝结为液体，而凝结的液体通过芯吸材料又将流回到热源处，从而开始新一轮的热流循环。有关热管性能的设计分析可以在 Kreith 和 Bohn 的书中找到[Kreith 和 Bohn，1997]。

和传统的热管一样，微型热管也是一个密封的管状容器，其中装载的流体可以在其长度方向上以液体和气体两种形态流动。典型的这种微型热管的截面形状是三角形和梯形，如图 2. 40(e)和(f)所示，其水力直径一般在 100 μm 左右(有关水力直径 d_p 的概念将在第 5 章中给出)。和常规热管不同的是，微型热管通常不需要采用芯吸材料来辅助冷凝的液体回流到蒸发端，在微型热管中回流的液体是受微型密封管道截面尖角处的毛细管压力驱使的，如图 2.44 所示。乙醇和甲醇是微型热管中常用的两种液体。这种新颖的想法最早是由 Cotter 提出的[Cotter, 1984]。

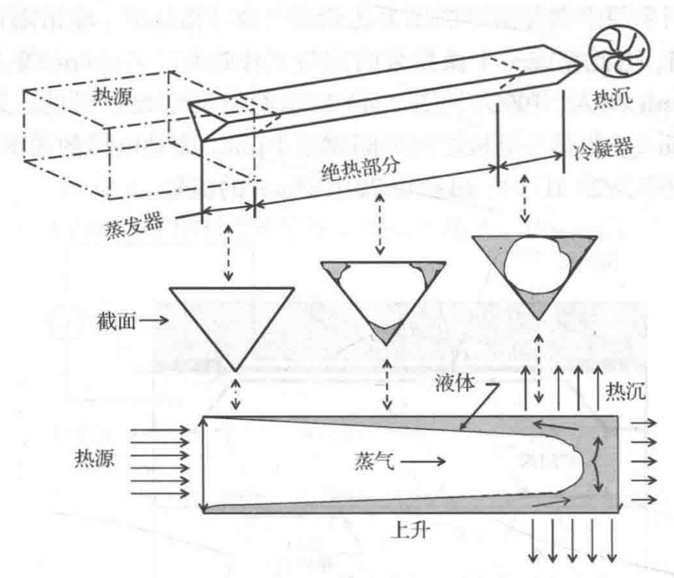


图 2.44 微型热管的轴向剖面图与截面图

正如在第 1 章中所描述的那样，晶体管等各类电子元器件一直在不断地小型化，这就带来了一个严重的技术难题，即如何将诸如笔记本电脑、个人数字助理(PDA)等产品中功耗密度高达 100 W/cm² 的某些器件所产生的多余热量及时耗散掉？况且这种趋势还在不断加剧。微型热管被认为是解决这个问题的一个有效方法[Le Berre 等人, 2003]。可以将这些热管的孔径制作得只有几微米，长度也不超过 1 厘米，这样它们就非常适合应用在电子器件的微小空间里来耗散多余的热量了。

本章习题

第一部分：多项选择

1. 传感器的基本工作原理是________。

   (1)将一种形式的能量转化成另一种；(2)转换信号；(3)转换符号

2. 声学波传感器用来探测________。

   (1)声音；(2)光照；(3)化学成分

3. 声学波传感器的工作原理是检测________所引起的固体谐振频率的改变。

   (1)材料特性改变；(2)声波传输；(3)材料声学特性改变

4. 声学波传感器中涉及到的驱动力是________。

   (1)声波；(2)应力波；(3)声学压力波

5. 医学诊断上用到________。

(1)生物传感器；(2)生物医学传感器；(3)两者都有

6. 生物医学传感器和生物传感器是________。

(1)相同的东西；(2)名称不同的东西；(3)用途不同的东西

7. 生物传感器的工作需要用到________。

(1)生物分子；(2)电化学化合物；(3)化学化合物

8. 化学传感器的工作原理为________。

(1)材料的化学特性与电特性的相互作用；(2)化学特性与机械特性的相互作用；(3)机械特性与电特性的相互作用

9. 任何一种暴露在特定气体中后其电特性就会发生改变的材料都可以用来制作________。

(1)化学传感器；(2)生物传感器；(3)热传感器

10. 光学传感器的工作原理是________。

(1)输入由光照产生的热；(2)输入光照射进来的光子能量；(3)固体表面的电子碰撞

11. 一个光伏器件可以________。

(1)探测热量；(2)探测电压；(3)产生电流

12. 压力传感器的工作原理是________。

(1)使得薄膜发生形变；(2)对薄膜进行加热；(3)由压力介质对薄膜进行磁化

13. 测量微压力传感器中薄膜的形变可以采用________。

(1)机械方法；(2)光学方法；(3)电学方法

14. 热传感器的工作原理是________。

(1)热力学；(2)温度计；(3)热电特性

15. 热电堆具有________个结点。

(1)一；(2)二；(3)三

16. 最少需要________种不同材料才能使热驱动工作。

(1)一；(2)二；(3)三

17. 形状记忆合金是具有________特性的材料。

(1)记忆其加工温度下形状；(2)被编程记忆其原始形状；(3)记忆其原始性能

18. 压电驱动的工作原理是________。

(1)电加热；(2)机-电转换；(3)电-机转换

19. 随着电极之间的间隙不断减小，静电致动的驱动力将________。

(1)不断增大；(2)不断减小；(3)保持不变

20. 分贝(dB)是________的单位。

(1)力；(2)温度；(3)声强

21. 作为负载输入到一个小型化微麦克风中的是________。

(1)声波；(2)压力波；(3)声学作用力

22. 小型化电容式微麦克风的工作原理是测量________的变化。

(1)气态向液态的转变压力；(2)薄膜与背板之间电容；(3)有输入压力波时薄膜电阻

23. 静电电动机的工作原理是________。

(1)闭合间隙；(2)相对电极的对准；(3)闭合并对准相对的电极

24. 微加速度计是用来测量与刚体变速运动相关的________。

(1)速度；(2)位置；(3)动态力

25. 链状弹簧框架在微加速度计中用作________。

(1)导电体；(2)加强件；(3)弹簧

26. 微陀螺仪是用来感知一个活动固体的________。
    (1)旋转运动；(2)直线运动；(3)直线运动与旋转运动的组合
27. 微陀螺仪的工作原理是基于一个活动固体旋转时的________。
    (1)科里奥利效应；(2)空气动力学效应；(3)扭矩效应
28. 音叉型微陀螺仪中的谐振器是给检测质量块提供一个________。
    (1)旋转运动；(2)科里奥利力；(3)直线运动速度
29. 微流体系统广泛应用于________分析。
    (1)热力学；(2)生物医学；(3)电子-机械
30. 微管道流动的一个主要问题是________。
    (1)毛细管效应；(2)摩擦效应；(3)压力分布
31. 热管是一个能够________的器件。
    (1)包含热量；(2)移动热量；(3)产生热量
32. 热管中的芯吸材料的作用是给热管中冷凝液的流动提供所需的________。
    (1)虹吸力；(2)冷却效应；(3)压力降落
33. 一般说来，微型热管________使用芯吸材料。
    (1)需要；(2)不需要；(3)有时会
34. 微型热管是________的有效方法。
    (1)产生热量；(2)耗散热量；(3)吸收微型化电子器件中所产生的多余热量
35. 微型热管利用________来产生必要的虹吸力量，以回流冷凝液。
    (1)尖锐拐角；(2)小的截面积；(3)较短的长度

第二部分：简述题

1. 举出至少两个传感器的实例来说明其符合 2.2 节中给出的定义。
2. 给出分别采用压电电阻和电容器作为信号转换器的优点和缺点。
3. 简述微压力传感器中采用的 3 种主要的信号转换方法，并针对每一种方法至少指出其一条主要优点和一条缺点。
4. 给出微传感器、微致动器和微流体器件的主要应用领域。
5. 为什么要用静电力来驱动微电动机，而不用常规的电磁力？为什么这种驱动技术没有被大型的机器设备采用？
6. 解释为什么在微压力传感器中硅膜应力状态的改变会导致其固有频率的改变。
7. 在如图 2.30 所示的微型麦克风中，解释背板上为什么要开孔。
8. 绘出电容式传感器的输出电压与平板电极间隙 d 之间的变化关系曲线，使用例题 2.2 中给出的平板电极几何结构和尺寸。当 d 趋于 0 时会发生什么现象？观察所绘曲线的形状。
9. 估算出图 2.17 所示的微热电堆的输出电压，假设其中的热电偶使用铜导线，热结点的温度为 120℃，而冷结点的温度保持为 20℃。
10. 简述微器件中常用的 4 种驱动技术，并针对每一种驱动技术至少指出其一条主要优点和一条缺点。。
11. 当外加直流电压为 70 V 时，计算平板电极之间的静电力，平板电极的几何结构和尺寸如例题 2.1 所述。初始时平板电极之间在长度方向和宽度方向上均偏移 20%，其中的介质材料采用的是耐热的硼硅玻璃，因此在施加电压时平板电极之间的间隙没有发生变化。我们假设平板电极与硼硅玻璃介质之间的摩擦可以忽略。
12. 如果采用类似于图 2.27 中的结构而不是采用如图 2.28 所示的结构，计算例题 2.4 中所需的外加电压。假设能够将驱动臂的倔强性等效为例题 2.4 中弹簧的弹性系数 $k = 0.05$ N/m，并且由于驱动臂的弯曲所引起的电极旋转可以忽略不计。

13. 对于如图 2.27 所示的微夹钳，如果其各部分尺寸如图 2.45 所示，请你作为设计工程师初步估算所需的外加电压。其中的驱动臂、闭合臂以及其上的电极均由硅材料构成，电极上覆盖一层薄的铜膜，电极之间的介质为空气，所有涉及到的材料性质可在表 7.3 中获得。你会发现按照图 2.45 所示的设计结构和尺寸，所需的外加电压将会高得不切实际，请问设计工程师如何才能将所需的外加电压降低到 40 V 以下？

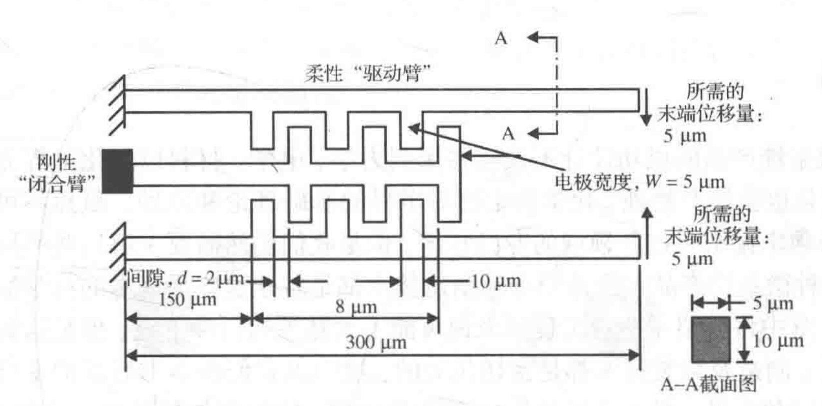


图 2.45　微夹钳结构设计图

14. 如图 2.39 所示的一个微陀螺仪，从顶视图上看，其中的检测质量块按逆时针方向围绕着 z 坐标轴以 10^{-2} rad/s(弧度/秒)的速率旋转，利用式(2.13)估算由此产生的科里奥利力。假设检测质量块的质量为 1 mg，它的振动频率为 10 000 rps(周/秒)，最大振幅为 ±100 μm。
15. 在习题 14 中，如果图 2.39 中链状弹簧的等效弹性系数为 100 N/m，估算出检测质量块在 y 方向的位移。

第3章　微系统设计与制造的工程科学

3.1　引言

大多数微系统产品的成功设计不仅需要用到力学、电学、材料以及化工等方面的基本理论和原理，而且也会涉及物理、化学和生物等学科的基础理论和原理。虽然不可能要求每一位工程师都必须掌握所有这些领域的专门知识，但是我们仍然需要了解这些不同学科的基础知识，因为各种微系统产品的设计原理和制造技术都是基于这些最基本的科学原理而发展出来的。因此本章中将介绍一些对工程师来说可能不太熟悉的科学论题，但是这些科学论题与微系统的设计、制造及封装技术都是密切相关的，这一点我们在本书后面的章节中还将进一步论述。为了简便起见，对于选择的每一个科学论题，我们都仅仅给出一个概括性的介绍。鼓励读者从本书引用的参考文献中搜寻有关这些科学论题更深入的介绍。

3.2　物质的原子结构

原子是宇宙中已知存在的一切物质的基础。地球上的每一样东西都是由96种稳定的元素和12种不稳定的元素构成的，每一种元素都有一个不同的原子结构。原子的基本结构包含一个原子核和在轨道上运动的电子，原子核由质子和中子组成，原子结构的不同导致元素性质的不同。图3.1给出了最简单的氢原子结构。从图中可见，原子核位于原子的中心，唯一的一个电子在原子核外面的轨道上环绕原子核旋转。

一般来说，原子中包含的电子不止一个，电子在原子中运行的轨道也不止一个，如图3.2所示。根据电子所处的不同能级，电子运行的轨道与原子核的距离也有所不同。能量较低电子的运行轨道与原子核相距较近，而能量较高电子的运行轨道则与原子核相距较远。原子中距离原子核最远的那些高能量电子可以和周围相邻的原子发生相互作用，从而形成固体结构。因此原子中处于最外层轨道上的那些电子是和周围的相邻原子共享的，这些电子称为价电子。在保持原子正常状态不变的情况下，改变电子的能量可以使得电子从一个轨道变换到另一个轨道。包含大量可动电子的材料称为导体，而那些包含大量束缚电子的材料则称为绝缘体或介质材料。

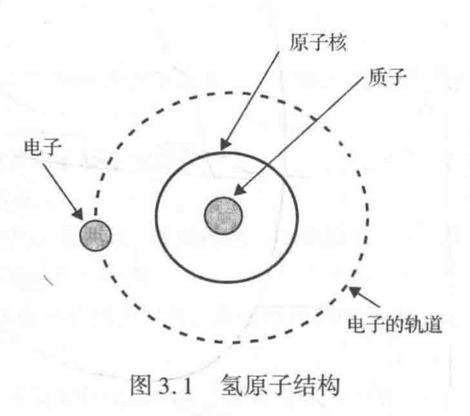


图3.1　氢原子结构

原子外层轨道的直径在 $2\times10^{-8}\sim3\times10^{-8}$ cm之间(或2~3 Å之间，1 Å $=1\times10^{-4}$ μm)，是原子核直径的1000倍左右。原子的核心是原子核，它包含中子和质子(如图3.2所示的N和P)。原子中的中子不带电荷，而原子核中的质子则带正电荷，电子带负电荷。质子和电子的质量分别是 1.67×10^{-24} g和 9.11×10^{-28}g。在中性状态下，一个原子中的质子总数和电子

总数是完全相等的(注意：氢原子的原子核中没有中子)。因此，质子带的总正电荷量与电子带的总负电荷量相等。举例来看，如图 3.1 所示的氢原子只包含一个电子和一个质子。另一个最简单的原子结构是锂原子结构[如图 3.2(a)所示]，它包含 3 个运行在两层轨道上的电子和 3 个位于原子核中的质子。而硅原子则包含 14 个运行在三层轨道上的电子和 14 个位于原子核中的质子[如图 3.2(b)所示]。原子中的总电子数通常被确定为特定物质在元素周期表中的元素序数或原子序数。包含有 103 种元素的周期表为工程师们提供了非常有价值的信息。图 3.3 所示是一个典型的元素周期表。

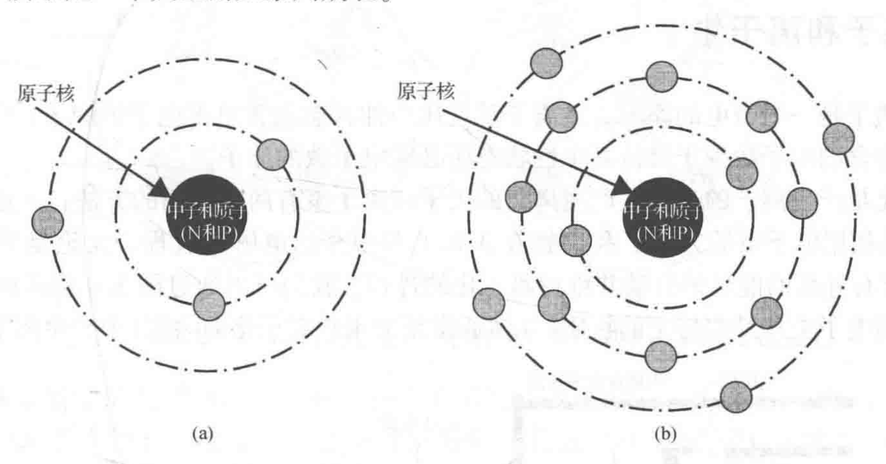


图 3.2　锂原子(a)与硅原子(b)的结构

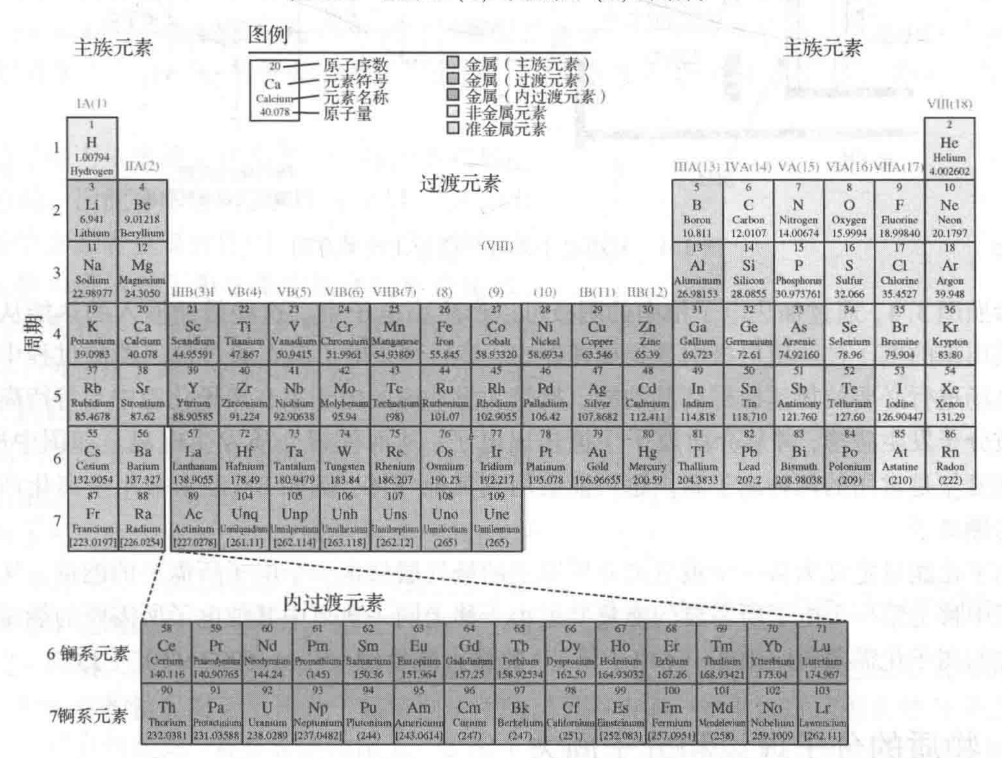


图 3.3　元素周期表

下面列出的是一组适用于原子结构的准则[Van Zant, 1997]，这些准则可以帮助工程师们更好地认识地球上所存在的各种元素的本质。

1. 在如图3.3所示的元素周期表中，每一种元素都包含特定数目的质子，没有任何两种元素所包含的质子数是相同的。
2. 包含有同样数目外层电子的元素具有相似的特性。
3. 外层填充有8个电子的元素是稳定的。
4. 所有的原子都倾向于寻找其他原子来结合形成稳定的、填满的外层电子层，即在外层具有8个电子。

3.3　离子和离子化

所谓离子是一个带电的原子。负离子就是比中性状态包含更多电子的原子；反过来，正离子就是包含的电子数少于维持其中性状态所必需电子数的原子。

离子化是产生离子的过程。产生离散的离子或离子束有两种常用的方法：一是利用电解工艺，二是利用电子束的方法。我们将在3.8.1节中介绍电解的过程。无论是采用哪种方法，都需要有外部的能量来启动并维持离子化的过程。我们可以通过图3.4所示的过程来说明如何利用电子束从某些特定的物质(气体通常是被用来离子化的物质)中产生离子。

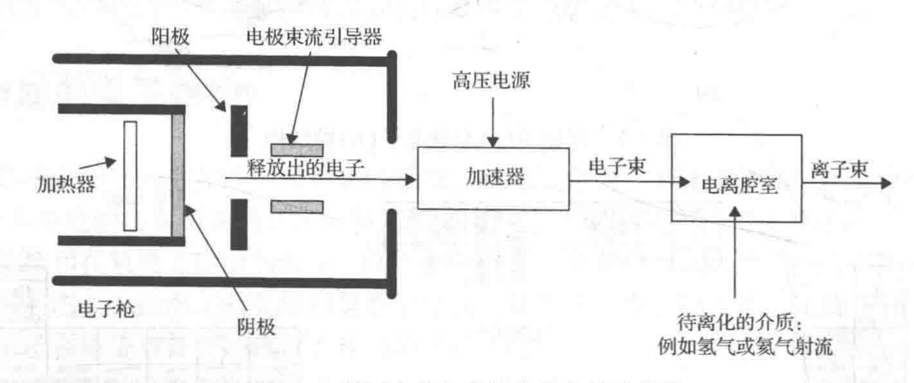


图3.4　利用电子束进行离子化的示意图

参照图3.4，通过加热电子枪中的阴极可以产生出电子束。这些借助输入的热能从阴极上释放出来的电子被一组电极引导到加速器中，然后这些电子流在通过加速器的过程中又被高压电场进行必要的加速以提高其动能。携带大量动能的电子束在离子化腔中与等待离子化的介质分子发生碰撞，并从介质原子中撞击出电子，从而使得介质发生电离。如图中所示，氢气和氦气是常用的两种离子源。也可能会用到其他气体，例如BF_3经常被用来离化产生带正电的硼离子。

离子化能量定义为从一个被电离介质原子的最外层移走一个电子所需要的能量。从最外层轨道中移走第一个电子所需要的能量要远小于移走同一轨道中其他电子所需要的能量。气体最佳的离子化需要50~100 eV(电子伏特)的输入能量($1\ eV = 1.6022\times10^{-19}$ J)。

3.4　物质的分子理论和分子间力

我们可以观察到这样的事实，就是不同形式的力或能量都能够使物质发生形变，不管这种物质是固体、液体，还是气体。一旦外加的力或能量撤除之后，这些变形的物质还能够部

分或全部恢复到它们原来的形状。这种现象提示我们可以假设各种物质都是由借助化学键相互连接在一起的粒子组成的，而这种化学键在外加的力或能量的作用下可以被压缩或拉伸。这些粒子就是组成这种物质的分子。分子是由原子组成的，例如图3.5(a)所示的硅晶圆片里就包含硅原子。分子也可以由相互化合的原子所组成，例如图3.5(b)所示的水分子中的氢原子和氧原子。

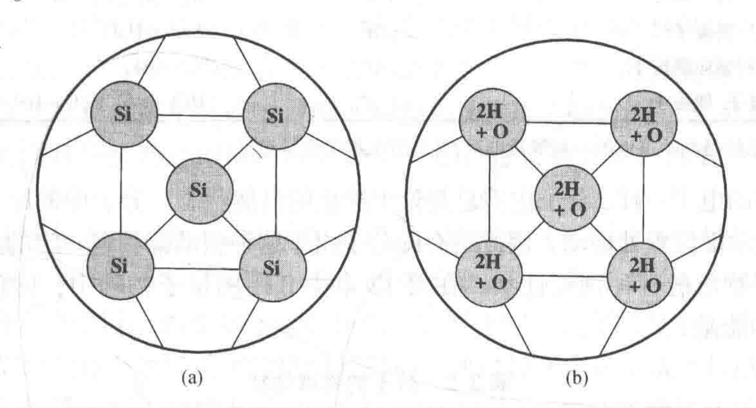


图3.5 组成物质的分子结构：(a)固体硅材料中的原子；(b)水中的分子

在图3.5所示的两种情况中，每一个原子都处于网格中的一个格点位置，该格点将它们与相邻的原子或分子彼此分开。这个网格起到了将分子中不同原子连接在一起的化学键的作用。这种键合力被称为是原子的内聚力或者分子间力，也称为范德华力(Van der Waals force)，它是表面微制造过程中引起薄膜粘连这一严重问题的主要原因，这个问题我们将在第9章中介绍。范德华力也是我们在第12章中构造分子动力学方程的主要考虑因素。

分子间力从本质上说属于化学作用力和静电力的范畴。因此分子之间的距离 d 在决定这些力的大小方面起着重要的作用。作为本质上的静电力，这些力应该基于第2章中所述的库仑定律，即同性电荷相斥，异性电荷相吸。首先我们来考虑这样一种情况，即一对处于自然状态的分子之间分开的距离是 d_0，这两个分子之间的作用力随分子间距离的变化可以定性地以图3.6所示的曲线来表示。

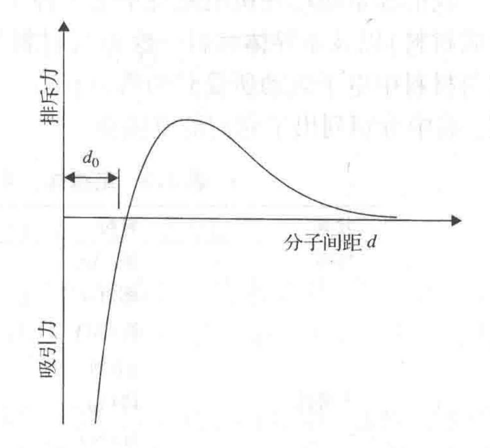


图3.6 分子间作用力随分子间距离的变化

图3.6的曲线显示，将这两个分子之间的距离拉大将会增大二者之间的吸引力，因为此时必须克服分子之间固有的内聚力。但是当分子之间距离进一步增大之后，一旦超出了原子内聚力的作用范围，就会导致分子之间吸引力的快速减小。后面这种情况对于气体分子是特别适用的。另一方面，如果通过压缩来使分子之间的距离小于其自然状态，就会导致排斥力。如图3.6所示，这种排斥力将会随着分子间距的减小而急剧增大。

尽管我们认识到分子间的作用力本质上是静电作用力，但是这些力的大小并不完全遵守第2章中介绍的库仑定律。对于分子中带有电荷的原子(也就是离子)来说，这些作用力的大

小与分子中这类原子之间的距离 d 的变化关系从 $1/d$ 到 $1/d^6$ 各不相同。Brown 和 LeMay 曾经对这些作用力进行了综述[Brown 和 LeMay, 1981]，如表3.1所示。

表3.1　含有带电原子的分子之间的作用力

相互作用类型	作用力或作用能与距离 d 的关系	举例
离子-离子	I/d	Na^+Cl^-, $Mg^{2+}O^{2-}$
离子-偶极子[a]	$1/d^2$	$Na^+ - H_2O$
离子-感应偶极子	$1/d^4$	$K^+ - SF_6$
偶极子-偶极子	$1/d^6$	$HCl - HCl$, $H_2O - HM_2O$

[a]偶极子指的是相距很近的一对等量电荷，其所带电荷的符号相反。

就像原子中的电子一样，分子也不总是处于静止的自然状态。分子中的原子总是在将它们连接在一起的化学键位置处振动。因此所有的分子由于这种振动都具有一定的动能。表3.2总结了不同状态下物质的各种物理性状。在第12章中介绍的量子物理中，我们将在原子的水平上来描述这些能量。

表3.2　分子的物理性状

物质	原子间的结合力	振动水平	动能水平
固体	强	不太剧烈	较低
液体	中等	比较剧烈	中等
气体	弱	最剧烈	较高

3.5　半导体材料的掺杂

我们经常应用在机电系统中的3种工程类的材料分别是导电体材料、绝缘体材料(或电介质材料)以及半导体材料。这种对材料的分类方法是依据材料的导电性能而建立起来的，它与材料中电子运动所受到的阻力有关。表3.3给出了几种常见的代表这3种不同类型的材料，表中分别列出了它们的电阻率。

表3.3　绝缘体、半导体和导体材料典型的电阻率

分类	材料	近似的电阻率 $\rho(\Omega\cdot cm)$
导体	银(Ag)	10^{-6}
	铜(Cu)	$10^{-5.8}$
	铝(Al)	$10^{-5.5}$
	铂(Pt)	10^{-5}
半导体	锗(Ge)	$10^{1.5}$
	硅(Si)	$10^{4.5}$
	砷化镓(GaAs)	$10^{8.0}$
	磷化镓(GaP)	$10^{6.5}$
绝缘体	氧化物	10^{9}
	玻璃	$10^{10.5}$
	镍(纯)	10^{13}
	金刚石	10^{14}
	石英(熔融)	10^{18}

对 MEMS 和微系统来说具有特别重要意义的材料就是半导体材料。半导体材料具有一定的自然导电性，但是其导电性又没有导体材料那么强。然而，当我们向半导体材料中注入某些特定的外来掺杂物之后，也可以将其电阻率由表 3.3 所示的数值降低到 10^{-3} Ω · cm 这样的数量级，从而将其转变为导体材料。这种将半导体材料转变成导体材料的工艺称为掺杂。通过将外来杂质引入到半导体衬底材料中并形成特定的掺杂图形区域，我们可以控制电流在半导体材料中的流动路径及电流密度。集成电路中制造出的微型晶体管和微电路就是利用这种掺杂工艺实现的。在 MEMS 和微系统的制造工艺中，对于硅衬底这样的半导体材料进行掺杂还可以改变材料抵御化学或物理腐蚀的能力，这也是微制造工艺中一个常用的技术。因此硅的掺杂经常被用作腐蚀的屏障或腐蚀终止层，有关这方面的内容将在第 9 章中详细介绍。

掺杂是微电子技术中制作 PN 结的基本工艺。半导体材料的掺杂可以通过注入带有不同电子数的外来原子来改变半导体材料中原子的电子数量。这种外来物质称为掺杂剂。能够释放出电子的原子称为施主，而能够接收额外电子的原子则变成了带负电荷的原子。

我们将举例说明像硅这样的半导体材料是如何通过掺杂而转变成导体的。回想一下前面介绍的硅的外层轨道上有 4 个价电子[如图 3.2(b)所示]。如果把像硼这样的外层轨道上有 3 个价电子的物质掺杂到硅中，所形成的材料中就会缺失一个电子，这样就产生了一个电子的空位，也就是空穴。P 型半导体材料就是这样形成的，图 3.7(a)展示了这样的掺杂过程。

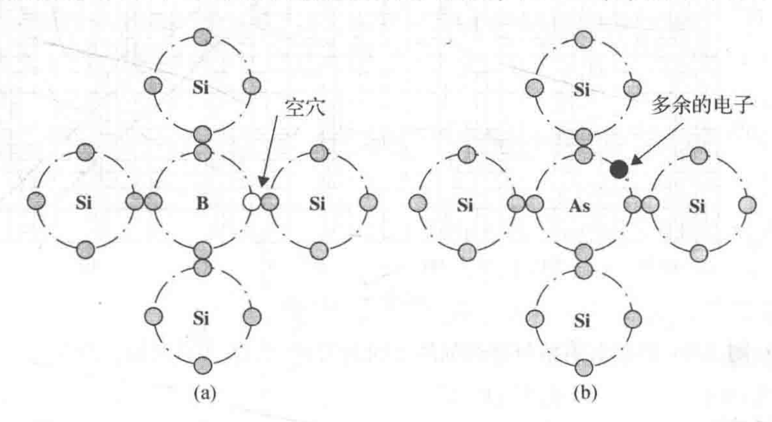


图 3.7　硅材料的掺杂：(a)P 型掺杂；(b)N 型掺杂

带有负电荷的硅(即 N 型掺杂的硅)也可以采用类似的掺杂工艺来实现，但是所使用的掺杂剂为砷或者磷。这两种掺杂材料的外层轨道都具有 5 个价电子。掺有这类杂质的硅材料中将出现一个多余的电子，如图 3.7(b)所示。

掺杂半导体材料中的这种电子数量的不平衡将有助于其中电子的流动，这样也就增大了材料的电导率。材料电导率增加的程度是与其电阻率的下降密切相关的。图 3.8 给出了掺有不同剂量硼杂质的 P 型硅材料和掺有不同剂量磷杂质的 N 型硅材料的电阻率的变化。从图中很容易看到，掺杂的剂量越高，硅材料的电阻率就越低，硅材料也就越容易导电。

半导体材料中的掺杂可以通过高温下的扩散工艺来实现，也可以通过室温下的离子注入工艺来获得，我们将在第 8 章中详细介绍这方面的内容。

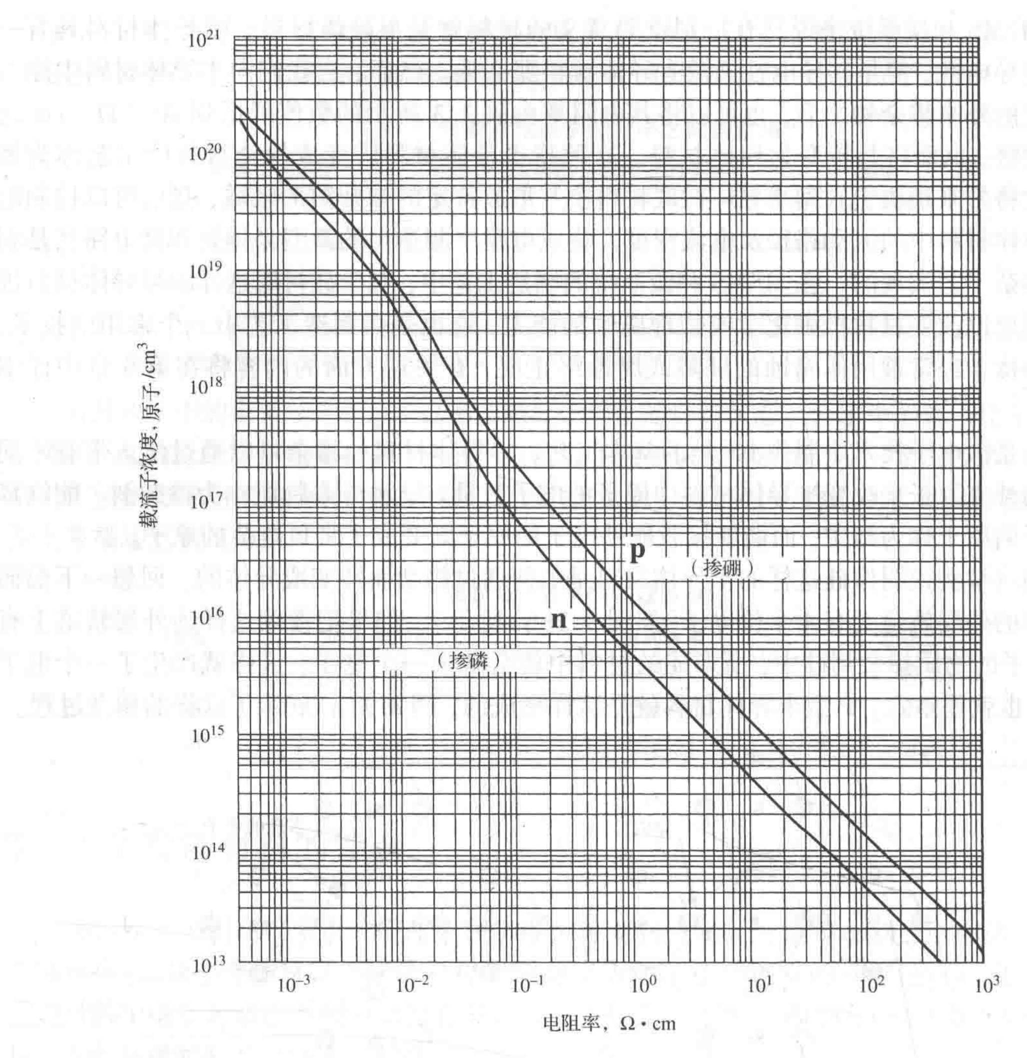


图3.8 硅的电阻率与掺杂剂量之间的关系(引自[Van Zant, 1997])

3.6 扩散工艺

扩散工艺指的就是在某种材料的选定区域中引入数量可控的另一种异质材料。扩散现象是在日常生活中经常可以看到的。一滴深色墨汁在一瓶清水中的扩展就是扩散现象的一个实例。在这种情况下，我们不仅可以很容易地看到墨汁在水中的快速扩展，而且能够观察到墨汁随着时间的推移在溶液中逐渐被稀释。自然环境中金属的氧化过程是气体-固体扩散现象的另一个实例。总之，正如上面这些实例所展示的，扩散现象可以发生在液体向固体中的扩散，也可以发生在气体向固体或液体向液体中的扩散。

扩散是一种常用的工艺，如前面所述，它是用来向硅晶圆片中引入外来物质进行掺杂的工艺。在微制造技术中，扩散可以被用来氧化硅晶圆片的表面，也可以在衬底材料表面沉积一层所需要的异质薄膜材料，在集成电路的制造过程中，扩散还可以在单晶衬底上形成一层外延层。扩散在常用的化学气相淀积(CVD)工艺中也起着很重要的作用。很多微混合器和微流体器件都需要用到扩散工艺。这里将给出这种非常重要的物理-化学过程的数学模型。

菲克定律是给扩散工艺进行数学建模的基础，它指出在具有特定浓度的液体 B 中（如图 3.9 所示），液体 A 向其中扩散的浓度与两种液体的浓度差成正比，同时与扩散作用发生的距离成反比。

因此参考图 3.9 并假设 $C_1 > C_2$，菲克定律可以用数学公式表示如下：

$$C_a \propto \frac{C_{a,x_0} - C_{a,x}}{x_0 - x} \tag{3.1a}$$

或者

$$C_a \propto \frac{\Delta C}{\Delta x} \tag{3.1b}$$

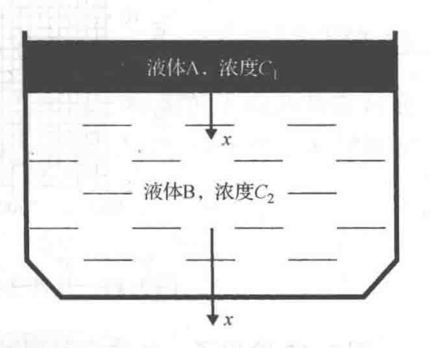


图 3.9　不同浓度液体的扩散

式中，C_a是液体 A 在时刻 t 通过距离初始接触面 x 位置处的扩散流密度，x_0是两种液体初始接触面的位置，C_{a,x_0}和 $C_{a,x}$分别是液体 A 在 x_0和 x 处的浓度。

式(3.1b)也可以依据浓度 C_a沿着 x 轴的连续增量变化以另外一种形式表示出来：

$$C_a = -D\frac{\Delta C}{\Delta x} \tag{3.2}$$

式中的常数 D 是液体 A 的扩散率。扩散率 D 通常可以看作是材料的特性。对于大多数材料来说，扩散率 D 随着温度的上升而增大。

事实上，扩散过程持续的时间，也就是扩散工艺中的时间 t，在液体 A 浓度的变化过程中起着重要的作用，如图 3.10 所示。

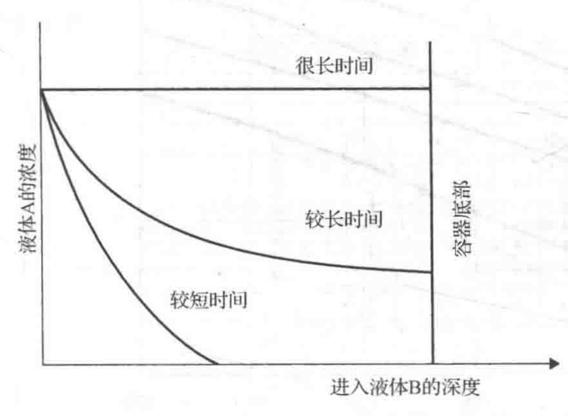


图 3.10　扩散过程中异质材料浓度的变化

在应用扩散工艺对半导体材料进行掺杂的过程中，通常要把半导体衬底材料加热到一个精心设定的温度上，然后再把掺杂剂引入到衬底材料的表面。在进行掺杂工艺之前，先用一层可以阻挡掺杂剂扩散的材料覆盖到衬底表面作为扩散掩模层。掺杂剂可以通过掩模层上打开的窗口扩散进入衬底表面，这样就可以控制掺杂的区域。掺杂剂可以一直向衬底材料中扩散，直到达到最大浓度。这个通过扩散形成的最大掺杂剂浓度被称为固溶度。图 3.11 给出了在微电子工艺和微系统加工中作为掺杂剂引入到硅衬底中的几种常见材料的固溶度。从图中不难看到对于每种掺杂剂都存在一个可以使其达到最大固溶度的最佳衬底温度。

一个与式(3.2)类似的用于描述一维固相-固相扩散现象的方程为[Kovacs，1998]：

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x} \tag{3.3}$$

式中，J 是通过扩散进入到衬底材料中的外来掺杂剂的原子、分子或离子的通量（单位是：原子/$m^2 \cdot s$）；D 是外来掺杂剂在衬底材料中的扩散系数或扩散率（单位是：m^2/s）；C 是外来掺杂剂在衬底材料中的浓度（单位是：原子/m^3）。

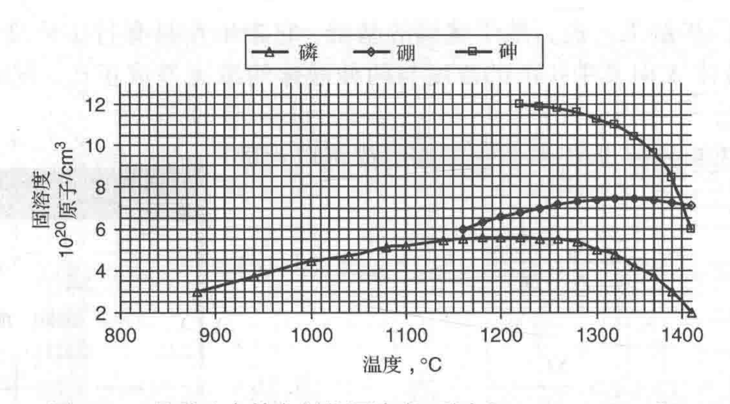


图 3.11 几种选定掺杂剂的固溶度(引自[Van Zant, 1997])

图 3.12 给出了一些特定材料的扩散系数的平方根$\sqrt{D}$随温度的变化情况(图中扩散系数平方根的单位是：$\mu m/h^{1/2}$)。由式(3.3)可见扩散的效果正比于扩散系数D，而由图 3.12 可见扩散系数D随着温度的升高而增大，因此我们不难得出温度越高、扩散工艺越有效的结论。然而，图 3.11 给出的掺杂剂在扩散工艺中的固溶度随温度的变化情况，在不降低扩散效率的前提下，限制了扩散工艺的最高温度。

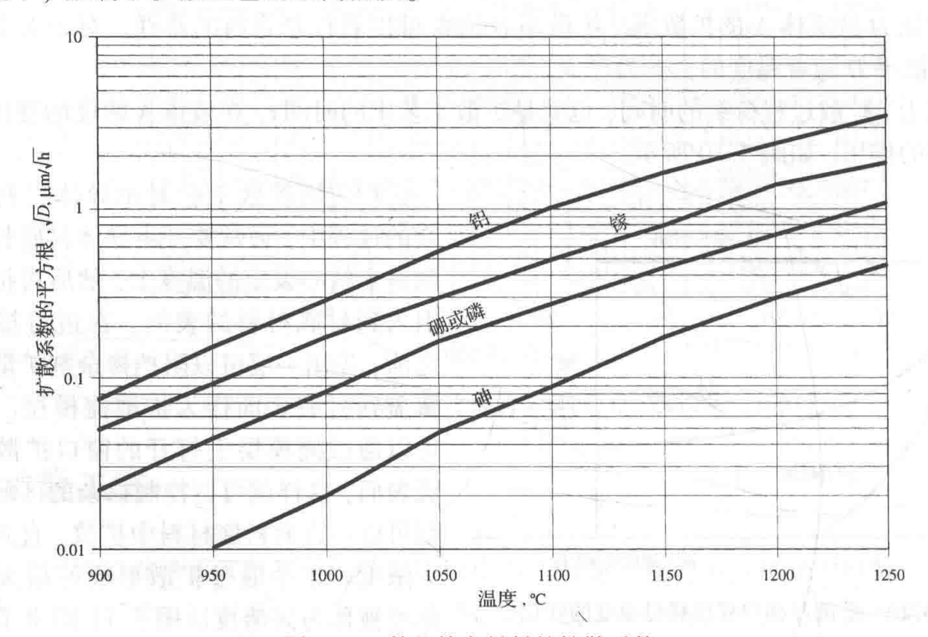


图 3.12 某些特定材料的扩散系数

图 3.13 展示了在微制造工艺中某种外来掺杂剂向硅衬底材料中扩散的情形。

图 3.13 所示的外来掺杂剂向衬底材料中扩散的浓度C随着三维空间位置(x, y, z)的变化而变化，其中y坐标轴、z坐标轴均与x坐标轴垂直。它需要求解一个复杂的包含4个变量(x, y, z, t)的偏微分方程，其中t是扩散过程的建立时间。

对于图 3.13 中外来掺杂剂在衬底材料中扩散浓度C的一个快速估算方法，是假设这个浓度随着时间t的变化仅仅发生在衬底材料的深度方向上，即x方向上。因此在一个特定的时刻，外来掺杂剂在衬底材料中某个特定深度处的浓度$C(x, t)$可以通过求解扩散方程(3.4)来获得。该扩散方程可以通过菲克定律以下述形式给出：

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \tag{3.4}$$

可以证明方程(3.4)的解具有下面的形式：

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \tag{3.5}$$

上式的初始条件为 $C(x,0)=0$，边界条件为 $C(0,t)=C_s$，也就是扩散温度下掺杂剂在衬底材料中的固溶度(如图3.11所示)。第二个边界条件为 $C(\infty,t)=0$，它反映了扩散在衬底材料中只是局限在一定深度范围内的局部区域中。

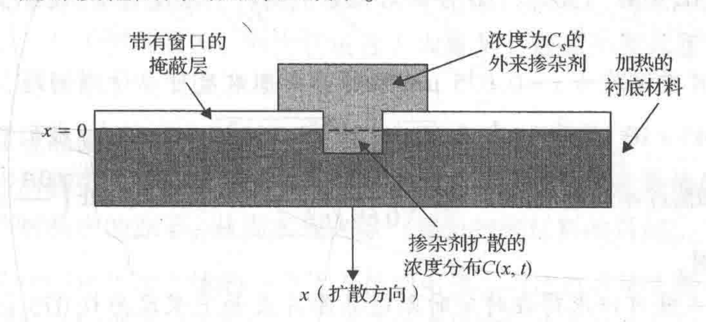


图3.13 某种固体掺杂剂向衬底材料中的扩散

式(3.5)是以余误差函数 erfc(X)的形式表示出来的，其定义就是 1 - erf(X)，其中 erf(X)就是所谓的误差函数。误差函数 erf(X)的数值可以从各种不同的数学用表中查到，例如在[Abramowitz 和 Stegun，1964]编撰的数学用表中就可以查到。图3.14提供了 erf(X)和 erfc(X)的近似值。

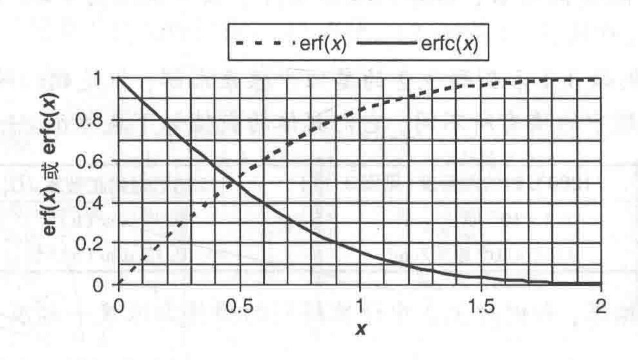


图3.14 某些特定变量的误差函数值

例题3.1 采用扩散工艺将磷掺杂到硅晶圆片衬底中。硅衬底在掺杂剂存在的条件下被加热到1260℃并维持30分钟。估算出硅衬底材料中深度为 x 处的掺杂剂浓度。

解答：由图3.11，可以得到磷在1260℃时的固溶度为 5.45×10^{20} 原子/cm^3，此即这个温度下该种掺杂剂的最大浓度。因此，我们有 $C_s=5.45\times10^{20}$ 原子/cm^3。同样，根据图3.12，可以得到该温度下的 $D^{1/2}=0.34\ \mu\text{m}/(\text{h})^{1/2}$。

根据上述结果，得到：

$$2\sqrt{Dt} = 2\sqrt{\frac{0.34^2\times 30}{60}} = 0.481\ \mu\text{m}$$

因此，扩散30分钟后在深度 x 处磷的浓度可以根据式(3.5)求得：

$$C(x,0.5) = C_s\ \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = (5.45\times10^{20})\ \text{erfc}\left(\frac{x}{0.481}\right)$$

通过查找图3.14，可以估算出在深度为0.075 μm处磷的浓度为：

$$C(0.075, 0.5) = (5.45\times10^{20})\ \text{erfc}\left(\frac{0.075}{0.481}\right) = (5.45\times10^{20})\ \text{erfc}(0.156)$$

$$= (5.45\times10^{20})\times0.82 = 4.47\times10^{20}\ 原子/\text{cm}^3$$

例题3.2 采用与例题3.1中相同的扩散工艺条件将磷掺杂到硅晶圆片衬底中。估算出分别经过30、60、90、120、150和180分钟后硅衬底材料中深度为 $x=0.075$ μm处的掺杂剂浓度。

解答：硅晶圆片中深度为 $x=0.075$ μm处的掺杂剂浓度可以仿照例题3.1利用式(3.5)求得，其中 $C_s=5.45\times10^{20}$ 原子/cm³，$2\sqrt{Dt} = 2\sqrt{(0.34)^2t} = 0.68\sqrt{t}$。我们可以得到：

$$C(0.075, t) = (5.45\times10^{20})\ \text{erfc}\left(\frac{0.075}{0.68\sqrt{t}}\right) = (5.45\times10^{20})\ \text{erfc}\left(\frac{0.1103}{\sqrt{t}}\right)$$

式中 t 的单位是小时。

根据上述表达式就可以求得在特定时刻硅晶圆片表面下深度为0.075 μm处由于扩散过程所引起的磷掺杂浓度，计算结果如图3.15所示。

从图3.15中可以看到，磷掺杂浓度在最初的一段时间内上升比较快，而在扩散达到2.5小时之后，其上升的速率就显著降低了。

例题3.3 在例题3.1中如果分别采用硼和砷来代替扩散工艺中的磷掺杂，在经历了例题3.2所确定的扩散时间之后，估算出硅晶圆片表面下深度为 $x=0.075$ μm处的掺杂剂浓度。

解答：可以按照例题3.1和例题3.2的类似步骤来求解，但是硼和砷的固溶度以及扩散系数都与上面两个例题中的磷有所不同，它们具体的数值如下表所示。

	1260℃时的固溶度(见图3.11)	1260℃时的扩散率 $\sqrt{D}$(见图3.12)
硼(B)	7.2×10^{20} 原子/cm³	0.34 μm/(h)$^{1/2}$
砷(As)	11.8×10^{20} 原子/cm³	0.12 μm/(h)$^{1/2}$

最后计算求得的结果，和例题3.2中计算得到的磷掺杂浓度一起展示在图3.16给出的曲线中。

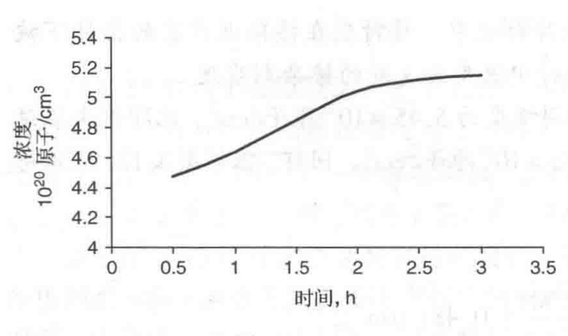


图3.15

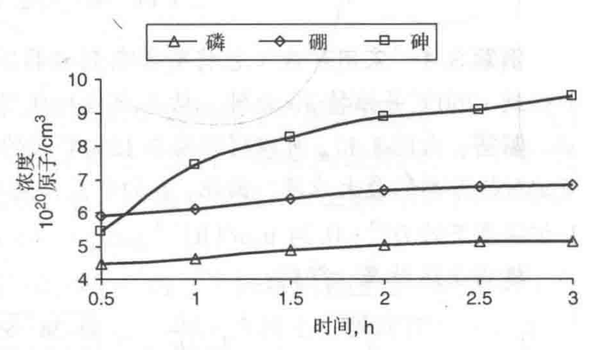


图3.16 硅晶圆片中硼和磷的掺杂浓度

从图 3.16 中我们注意到这样一个有趣的现象，硼与磷的扩散率相同，二者浓度随时间的增长速率也类似；而另一方面，由于砷具有较低的扩散率和较高的固溶度，其在晶圆片中同样深度处的浓度随时间的变化则表现出了截然不同的情况。

3.7　等离子体物理

等离子体就是携带了一定电荷量的气体，它包含在数目上近似近似相等的电子和正电荷离子。因此从一个整体的角度来看，等离子体是一个电中性的离化气体的混合物。等离子体在微制造工艺中是一个关键的要素，因为它包含了大量具有极高动能的正离子，这些高能离子在微制造工艺中可以用来实现以下几个基本功能：

1. 可以辅助在硅晶圆片等衬底材料上沉积一些外来的其他材料。
2. 可以辅助将所需引入的外来杂质穿透到衬底材料中，实现外来杂质的注入。
3. 可以轰击出材料中的原子，从而实现去除一部分衬底材料的目的。

在微制造工艺中使用等离子体的一个优点是利用静电力或电磁场来操纵它的流动相对比较容易。等离子体辅助的刻蚀与溅射以及等离子体增强的气相沉积都是微制造工艺中比较流行的且行之有效的技术，我们将在第 8 章中再对其进行详细介绍。

图 3.4 展示了用于产生等离子体的各种离子是如何形成的。在大多数情况下，首先利用一个电子枪产生出自由电子，如图 3.4 所示。这些电子经过加速器的加速之后以很高的速度运动。高速运动的电子进入到反应腔中之后，进一步从离化的媒介(例如氢气、氦气或氟化硼等载体气体)中撞击出更多的电子，如图 3.4 所示。按照[Ruska, 1987]的分析，在等离子体发生器里面还将发生下述几种过程：(1)离化，(2)分裂，(3)激发，(4)复合，如图 3.17 所示。

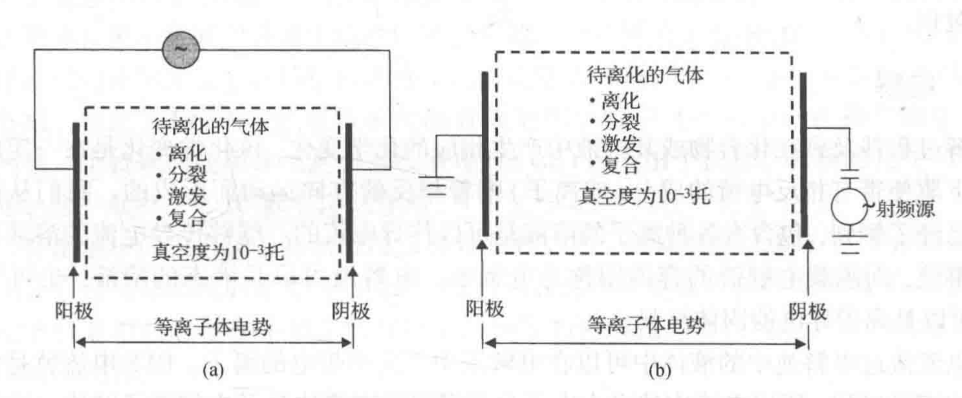


图 3.17　等离子体发生器示意图：(a)利用电场；(b)利用射频能源

离化　在这个过程中，一个电子被从媒介 M 的原子中撞击出来，形成一个带正电荷的分子或离子：

$$e^- + M \rightarrow M^+ + 2e^- \tag{3.6}$$

分裂　媒介 M_2 的一个分子分裂成很多细小的碎片，可能伴随有离化过程，也可能没有发生离化：

$$e^- + M_2 \rightarrow M + M + e^- \rightarrow M^+ + M + 2e^- \tag{3.7}$$

激发 不同的分子聚集在一起，并从反应腔提供的高速电子中吸收能量，由此产生一个激发的电子态(M^*)：

$$e^- + M \rightarrow M^* + e^- \tag{3.8}$$

复合

$$e^- + M^+ \rightarrow M(或M^*) \tag{3.9}$$

由于电子是维持等离子体存在的离化源，因此必须保持连续不断的电子供应，因而也就必须一直向等离子体发生器上施加高压电场[如图3.17(a)所示]或射频源[如图3.17(b)所示]等能源。这些能量必须保证等离子体发生器的阴极能够连续地释放出大量的电子。

3.8 电化学

电化学研究的对象是由于电流通过而引起的化学反应，它也是微系统设计和制造中的一个重要研究领域。电化学反应已经被应用于大量的工程过程中。电化学过程在微加工和微系统设计领域的主要应用包括以下几个方面：

1. 在LIGA工艺中利用电解的方法在聚合物模具上电镀一些薄的金属层，具体的工艺细节将在第9章中详细介绍。
2. 在应用电液动力学原理的微型致动泵中，利用电泳和电渗透的方法来驱动微流体系统中流体的毛细管流动。

在前面提到的电解工艺中的电化学反应在微制造工艺中具有特别重要的意义。在生物技术和制药工业中，电液致动泵技术广泛应用于生物医学溶剂或分析物中不同物种的分析。这些分析系统的工作原理在第2章中已经做了介绍。我们在这里将重点介绍电解工艺和电液动力学的过程。

3.8.1 电解

电解过程涉及到在化合物或其溶液中产生相应的化学变化，该化学变化是在一定的电势差作用下驱使带有相反电荷的成分(或离子)朝着相反的方向运动而形成的。我们从前面的章节中已经了解到，包含有各种离子的溶液是可以传导电流的。能够传导电流的溶液通常被称为电解液，而承载电解液的容器则称为电解池。电解液可以是液态的溶液，也可以是熔盐，还可以是离子导电的固体材料。

让电流流过电解池中的液体中可以在电解液中产生出带电的离子。因为电流就是由于电子的流动而形成的，所以电流中的自由电子也就可能改变流体分子中的原子结构。这就可能会导致一些电子数目无法达到平衡的原子，从而也就会在溶液中产生一些带有电荷的自由离子。

除了电解池之外，在电解的过程中还需要有一对浸没在电解液中的电极来提供电位。电解过程的一个简单实例就是在电解池中分解熔融的氯化钠(NaCl)，这个过程如图3.18所示。

电极通常放置在电解池的两侧。当把电极连接到直流电源上之后，就在二者之间建立了一个电位差。外接的这个直流电源通常是电池，它像一个电荷泵一样将电子抽吸到一个电极上，使之成为阴极，同时从另一个电极上将电子抽吸出来，使之成为阳极。通过的电流将熔

融的盐分解成带正电荷的钠离子和带负电荷的氯离子，如下述反应式所示：

$$2NaCl \rightarrow 2Na^{+} + Cl_2^{-} \tag{3.10}$$

由熔融的盐中分解出的钠离子 Na^+ 不断地从阴极上获得电子，由此导致阴极上的电子不断减少。当阴极附近的钠离子 Na^+ 发生耗尽之后，就会有其他的钠离子 Na^+ 迁移过来。类似地，氯离子 Cl^- 同时也在不断地向阳极迁移。因此通过整个电解工艺，我们就可以分别在阴极和阳极上收集到钠(Na)和氯(Cl)。

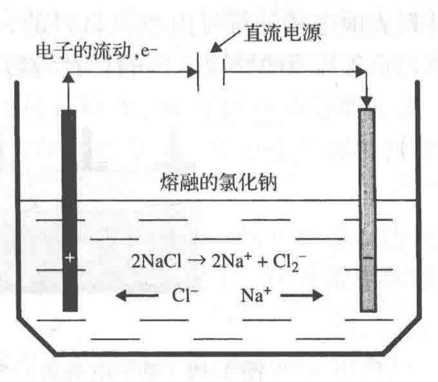


图 3.18　一个电解工艺的实例

电解工艺在分离和提取一些化合物时是一项非常有用的技术，该技术对于微系统设计和制造的价值在于离子化的流体能够通过施加电场的方式促使其流动。电解液中的离子在电场的作用下发生流动，由此导致了一个非常重要的技术，即我们熟知的有关微流体流动的电液动力学，我们将在 3.8.2 节中对其进行详细论述。

3.8.2　电液动力学

电液动力学(EHD)研究的是通过在流体上施加电场后所引起的流体流动现象。在微系统中，电液动力学有两个方面的主要应用：(1)电渗透泵；(2)电泳泵。这种独特的泵送技术被用来推动各种化学和生物流体在具有极小截面积的管道中运动，管道的截面积从几个平方微米到几个平方毫米的量级，流速则在几个立方微米每秒的量级上。第 2 章中介绍的微流体技术已经被广泛应用于制药产业和生物化学分析领域，在这些分析中仅仅需要使用几百纳升($1\ nL = 10^{-9}\ L$)量级的极微量的样品。

基于电液动力学原理的泵送技术没有涉及到诸如旋转螺旋桨这一类的运动机械部件。通常推动流体在极小截面积管道中流动的唯一有效方法是借助于毛细效应，该效应对于小导管中流体流动的作用主要是起因于流体分子的表面张力和范德华力，这一点我们将在第 5 章中详细介绍。因此，传统的容积机械泵无法有效地用于驱动这些极小截面积管道中流体的流动。另外一个特殊的应用领域是将毛细管电泳(CE)方法用于快速、精确的化学与生物分析技术中，这一点将在第 10 章中详细介绍。

要在溶液中产生出自由的电荷可以有好几种方法，例如利用 3.8.1 节中介绍的电解法。对于电介质流体如果施加非常高的电压，也可以在流体中形成可控浓度的离子。另一种产生电荷的方法是对具有电导率和介电常数空间梯度的多层流体进行放电，如下述方程[Bart 等人, 1990]所示：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v\nabla\rho + \frac{\Omega}{\varepsilon}\rho = \mathbf{E}\cdot\nabla\varepsilon - \mathbf{E}\cdot\nabla\Omega \tag{3.11}$$

式中，ρ 是自由电荷密度；$\mathbf{E}$ 是电场强度；ε 是流体的介电常数；Ω 是流体的欧姆电导率；$\nabla\rho$、$\nabla\varepsilon$ 和 $\nabla\Omega$ 分别是流体的自由电荷密度梯度、介电常数梯度和欧姆电导率梯度。

图 3.19 展示了管道电渗泵[Bart 等人, 1990]中离子溶液的产生过程，该溶液由两种具有不同电阻率 Ω_1 和 Ω_2 以及不同介电常数 ε_1 和 ε_2 的物质构成。在外加了一个垂直于导管壁的电场之后，就会在溶液中形成一个两种物质的分界面。溶液中存在的电导率梯度就会导致自由电荷的产生，这一点可以通过两种物质之间的电阻率差和介电常数差来反映。这种多层流体

材料表面电荷的符号由相关材料的介电常数决定。例如，如果第一层流体材料近似于绝缘体，那么其表面感应电荷的符号将与其上的电极阵列相反。

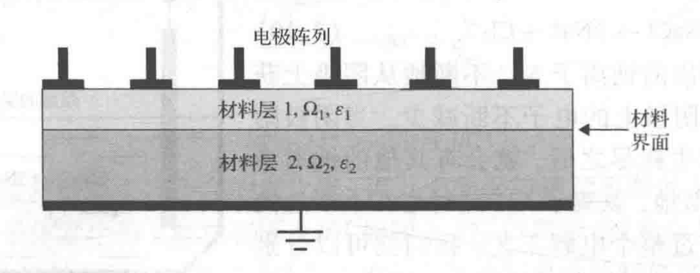


图 3.19 基于电液动力学原理对某种溶液实现的泵送[Bart 等人, 1990]

一旦流体中产生出了自由电荷之后，要沿着管道的轴向来泵送流体，就可以通过沿着管道的长度方向给电极阵列之间施加电场来实现，如图 3.19 所示。图 3.20 展示了通过电渗透泵送原理来输送同质流体的过程，而图 3.21 则展示了通过电泳泵送原理来输送异质流体的过程。

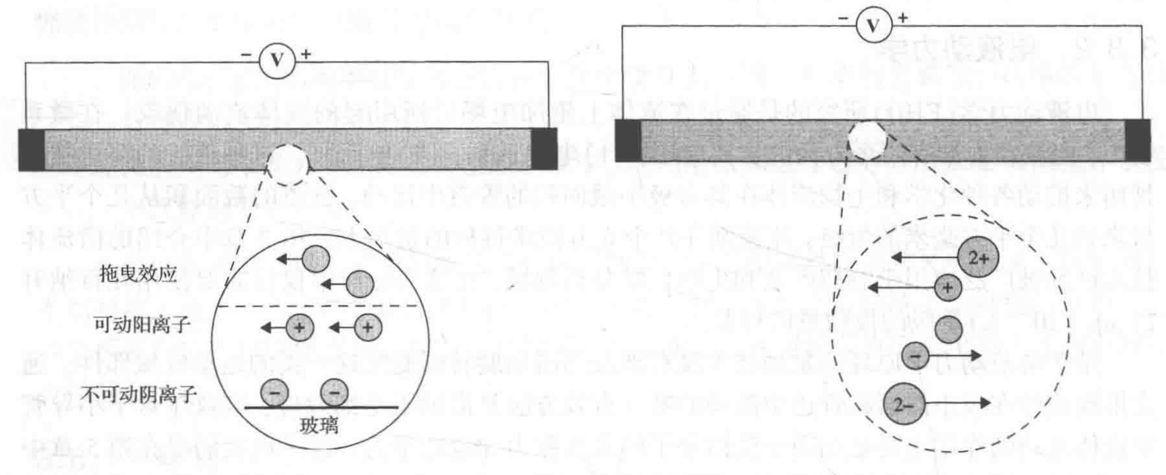


图 3.20 电渗透泵送原理(引自[Kovacs, 1998])

图 3.21 流体中离子的电泳泵送过程(引自[Kovacs,1998]和[Manz等人,1994])

电渗透泵送原理 电渗透泵送技术已经被用在具有极小截面积的管道中输送电中性的液体，其条件是导管或管道的壁上必须附着有不可移动的电荷。图 3.20 所示的玻璃壁如果涂敷了离化的材料(例如已经去除质子的硅烷醇基)，或流体中存在能够强烈吸收电荷的物质[Manz 等人, 1994]，都可以在其表面产生这种不可移动的电荷。在这种情况下，任何电解液在毛细管微管道中都能够产生流体的电渗透运动，如 3.8.1 节中所述。因为电荷的浓度梯度向着管道中心处逐渐降低，由此就形成了一个电荷浓度变化的双流体层，如图 3.20 所示。双流体层中的电荷可以在外加电荷的作用下沿着长度方向运动。最终这些运动电荷的动量可以推动溶液通过流体管道。电渗透流动有一个特性，就是整个流体在管道截面上可以获得一个均匀的速度。

电泳泵送原理 这种泵送方法经常被用于从大量的流体中分离出微量的外来粒子或其他杂质。采用电泳泵送技术的微流体系统已经被广泛应用于生物医学和制药工业中，如 2.6 节中所述。这种泵送技术还可以用来驱动异质流体在具有微小截面积的导管或管道中的流动。

通过施加高压电场可以导致异质媒介粒子中的离子运动，如图 3.21 所示。在分离过程中，带有不同电荷的离子将会在管道中沿着相反的方向运动。当整个流体完全进入流动状态之后，流体中的不同离子由于其在外加电场作用下所固有的电渗透迁移率，就可以自动分离出来。这正是我们在化学和生物分析中特别希望看到的情形，因为在这些分析工作中要分离出各种微量的物质往往是一件非常困难的任务。

电渗透泵送技术和电泳泵送技术的流速都是与外加电场成线性关系的。这种泵送方法没有包含运动的机械零部件，它们特别适合于微型化的系统。在大多数情况下，这种微流体系统都只需要使用极少量的被分析物样品。

在电泳泵送技术中自由电荷的运动速度可以通过下面的表达式来计算[Kovacs，1998]：

$$v_i = \frac{z_i q}{6\pi r_i \mu} E \tag{3.12}$$

式中，v_i是在同质流体中带电荷z_i的离子 i 的速度；E 是外加的电场；r_i是导管的实际半径或水力学半径；μ 是流体的黏度；q 是电子电荷(1.6022×10^{-19} C)。

从式(3.12)中很容易看到，在这两种基于电液动力学的泵送技术中，自由离子的速度以及流体的流动都是与外加的电场成线性关系的。我们将在 5.6 节和 10.7.2 节中再来进一步回顾这些泵送系统。

本章习题

第一部分：多项选择

1. 地球上的所用物体都是由________种稳定的元素组成的，每种元素都有不同的原子结构。
   (1)86；(2)96；(3)106
2. 一个原子的核心是________。
   (1)中子；(2)原子核；(3)电子
3. 元素具有不同的性质，是因为它们具有不同的________。
   (1)原子结构；(2)化学组成；(3)物理组成
4. 不同元素在其各自原子结构中的外围轨道上具有相同的________时，它们具有相似的性质。
   (1)电子数；(2)质子数；(3)原子核数
5. 原子核通常包含________。
   (1)中子和质子；(2)电子和质子；(3)中子和电子
6. 质子________。
   (1)携带正电荷；(2)携带负电荷；(3)没有电荷
7. 电子________。
   (1)携带正电荷；(2)携带负电荷；(3)没有电荷
8. 中子________。
   (1)携带正电荷；(2)携带负电荷；(3)没有电荷
9. 原子外围轨道的直径是原子核直径的________。
   (1)100 倍；(2)1000 倍；(3)10 000 倍
10. 元素周期表包含________种元素。
    (1)96；(2)103；(3)108
11. 硅原子包含________个电子。
    (1)8；(2)10；(3)14

12. 硅原子外层轨道包含________个电子。

(1)4；(2)6；(3)8

13. 价电子是位于原子________轨道上的电子。

(1)最内层；(2)最外层；(3)高能量的

14. 价电子是一个原子与相邻原子________的电子。

(1)共享；(2)接触；(3)相互运动

15. 硅原子具有________个价电子。

(1)0；(2)2；(3)4

16. 自由电子可以通过给阴极________来产生。

(1)加热；(2)冷却；(3)施压

17. 离子携带________。

(1)电荷；(2)磁荷；(3)静电电荷

18. 电离能指的是从原子最外层轨道上移走________所需要的能量。

(1)中子；(2)质子；(3)电子

19. 分子是由有限数量的________组成的。

(1)电子；(2)原子；(3)原子核

20. 分子中约束原子的力称为________。

(1)分子间力；(2)静电力；(3)电磁力

21. 分子间力本质上就是________。

(1)范德华力；(2)静电力；(3)电磁力

22. 分子间力通常与分子之间的距离________。

(1)成比例；(2)相等；(3)成反比

23. 固体分子物理特性的典型表现是________。

(1)动能和原子内聚力强；(2)动能和原子内聚力弱；(3)动能弱，但原子内聚力强

24. P型硅可以通过掺杂________得到。

(1)硼原子；(2)磷原子；(3)以上两者中的任意一种

25. N型硅可以通过掺杂________得到。

(1)硼原子；(2)磷原子；(3)以上两者中的任意一种

26. 硅是一种半导体材料，它可以通过________使其导电性能更好。

(1)掺杂工艺；(2)扩散工艺；(3)电子注入工艺

27. 在经过了相同剂量的掺杂剂掺杂之后，N型硅与P型硅相比，导电性________。

(1)更弱；(2)更强；(3)近似相等

28. 掺杂工艺中的施主就是可以________电子的原子。

(1)失去；(2)获得；(3)产生

29. 扩散是在硅衬底上进行________的好办法。

(1)涂层；(2)注入；(3)去除外来杂质

30. 在硅衬底上扩散外来杂质可以形成晶体管所需的________结。

(1)P-N；(2)P-P；(3)N-N

31. 对于扩散工艺的分析是基于________。

(1)傅里叶定律；(2)菲克定律；(3)胡克定律

32. 固体材料的固溶度提供了扩散工艺的________温度。

(1)最低；(2)最佳；(3)可溶解

33. 材料的扩散率是其扩散工艺________的度量。

(1)效率；(2)速度；(3)温度

34. 等离子体是________电荷的气体。
   (1)一定携带；(2)一定不携带；(3)可能携带
35. 为了维持等离子体，必须对等离子体腔持续供应________。
   (1)高温；(2)高压；(3)高电场
36. 电化学涉及到由电流导致的物质的________。
   (1)化学反应；(2)离化；(3)分解
37. 电解涉及到外加一个电势之后，物质中________的产生。
   (1)化学成分；(2)化学变化；(3)离化
38. 电解使用________电源供电。
   (1)交流；(2)直流；(3)以上两者中的任意一种
39. 电解液是电解工艺中传导电流的________。
   (1)电极；(2)容器；(3)溶液
40. 阳极是________。
   (1)正电极；(2)负电极；(3)中性电极
41. 阴极是________。
   (1)正电极；(2)负电极；(3)中性电极
42. 电液动力学处理的是流体在外加电场作用下的________问题。
   (1)溶解；(2)运动；(3)凝固
43. 电液动力学在微系统中的主要应用是________。
   (1)进行微量化合物的电解；(2)输送微量流体；(3)进行微量流体的检测
44. 电渗透泵送技术被用于移动毛细管通道中微量的________流体。
   (1)同质；(2)异质；(3)任意
45. 电泳泵送技术被用于移动毛细管通道中微量的________流体。
   (1)同质；(2)异质；(3)任意

第二部分：简述题

1. 以纳米(nm, 1 nm = 10^{-9} m)为尺度来表示氢原子与硅原子的大小和重量。
2. 在元素周期表中，“原子序数”和“族数”分别代表什么含义？
3. 为了使得半导体材料能够导电，必须使其电阻率达到多少？
4. 解释式(3.2)和式(3.3)菲克定律中负号的物理意义。
5. 为什么掺杂工艺对半导体产业来说是非常重要的？掺杂工艺是如何实现的？
6. 半导体产业中用来给硅晶圆片进行掺杂的两个主要工艺技术是什么？针对这两种工艺技术分别指出其一个优点和一个缺点。
7. 为了通过扩散工艺对硅衬底分别进行砷掺杂、磷掺杂和硼掺杂，请确定最佳的硅衬底温度，并指出在这些最佳温度下各种掺杂剂的固溶度。
8. 在例题3.1中当扩散时间分别为30、60、90、120、150和180分钟时，绘制出磷原子浓度在硅衬底深度方向的分布函数。
9. 确定硼在硅衬底中掺杂所需要的时间，要求掺杂后硅衬底中深度为2 μm处的电阻率为 $10^{-3}\Omega\cdot cm$。
10. 描述在电解工艺中离子是如何产生出来的。
11. 描述电泳和电渗透的原理。在MEMS和微系统中，哪些地方用到了电泳和电渗透的原理？
12. 解释微流体流动中的毛细管效应，为什么常规的机械泵不能用来驱动有毛细管效应的微管道中的流体？

第4章　微系统设计中的工程力学

4.1　引言

正如我们在第2章中所了解到的，大多数微系统都是由三维结构组成的，并且这些三维结构常常涉及热传导以及固态与液态之间的相互作用。此外，微系统中的很多元件本质上就是一些微观尺度的机械零件，例如齿轮、弹簧、轴承、传动杆以及其他一些机械装置。因此，在处理有关微系统的设计和封装等问题时必须应用机械工程和机械设计的原理。

在本章以及后续的章节中，我们将学习如何将连续介质理论中有关固体和流体力学以及热传导的机械工程原理应用于微系统中各种具有微观和介观尺度的元器件的设计。我们也将讨论把这些源自连续介质理论的唯象模型用于几个微米尺度的这类微小元件可能存在的一些局限性。在这些情况中，将会用到第3章和第12章中给出的许多科学原理来作为修正的基础，以适应亚微米尺度微小结构的需求。

工程力学既涉及固体力学，也涉及流体力学，它是微系统机械设计的基础。无论是为了确保微系统功能的正确性和结构的完整性，还是为了确保其可靠的系统封装，都需要用到工程力学的原理。工程力学是工程科学的一个专门的领域，在本章中我们也不可能针对整个工程力学这个学科专门来展开讨论，因此下面仅仅选择几个对于微器件与系统的设计和封装比较有用的专题来进行一些相对来说比较浅显的探讨。

按照传统的定义，力学是工程科学的一个分支，它主要研究物体所受的外力与物体在外力作用下的运动之间的关系。在微系统领域所提到的“运动”一词既包括刚体的运动，例如微加速度计中的运动，也包括固体发生的形变，例如微压力传感器中振动膜的形变（如图2.8所示）。在微加速度计和压力传感器的设计与实际工作过程中，常常会根据动力学和机械振动的原理，利用在谐振频率上发生振动的梁来获得高灵敏的输出信号（如图2.14所示）。同样，固体力学的原理也被广泛应用于系统封装的设计工作中。

另一方面，流体力学原理也已经被应用于微型阀和微流体器件的设计工作中。按照理想化的载荷与几何结构推导出的经典理论和公式常常不能够满足MEMS和微系统设计所需要的分析要求。在这种情况下，就必须采用诸如计算流体动力学（CFD）以及有限元方法等数值计算技术来求得精确的解。工业界通常采用一些商用的CFD和有限元程序来进行这类产品的设计。

我们还将进一步学习如何把宏观尺度下固体的热传导理论应用于分析MEMS结构中的热传导过程以及由此而形成的温度场分布。我们将在第12章中对这些原理应用于几个微米尺度的器件时所必须采取的一些实质性修正措施进行概括。我们将在第5章中介绍有关流体力学和热传导理论在微系统设计中的应用。

固体力学问题中的单位　对于工程师来说，在微系统的应力分析中采用一套统一的单位制是一个比较谨慎的做法。我们推荐在这类应用中使用下述的国际单位制（SI）：

力的单位使用牛顿（N）。1牛顿的力被定义为“使得1千克（kg）的质量产生1米每秒平方（m/s^2）的加速度所需的力”。因为1 kg的质量所受的重力为9.81 N，所以我们能很容易得

出 1 kg 的力等同于 9.81 N。读者可能会注意到我们在上面的力学单位推导过程中使用的重力加速度是 $g = 9.81\ \text{m/s}^2$。在微系统设计中我们推荐使用的热物理量的单位以及在国际单位制和英制系统之间的转换关系可以分别在本书的附录 1 和附录 2 中找到。

我们推荐使用米(m)作为长度单位，因此 1 μm = 10^{-6} m，1 mm = 1000 μm。在所有的计算中我们推荐使用千克(kg)作为质量单位。

压强和应力的单位用帕斯卡(Pa)，1 Pa 等价于 1 N/m^2，由此可得，1 MPa = 10^6 Pa = 10^6 N/m^2。

4.2 薄板的静力弯曲

在第 2 章中，我们了解到许多微压力传感器的工作原理是将受外加压力作用而发生形变的薄硅膜片中产生的应力转变成所需形式的电信号输出。对于大多数情况而言，这些膜片，无论其形状是圆形、正方形还是矩形，都可以作为在横向承受均匀外加压力引起弯曲的薄板来进行近似处理。

在一本比较有用的参考资料[Timoshenko 和 Woinowsky-Krieger, 1959]中可以找到有关平板弯曲的几个闭合解的形式。有关矩形平板承受横向偏转挠曲的主微分方程可表示为：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)=\frac{p}{D} \tag{4.1}$$

式中，$w = w(x, y)$ 是一个平板由于均匀分布的外加压力 p 的作用而产生的横向挠曲。x-y 平面定义了这个平板的位置，如图 4.1 所示。

参数 D 是平板的弯曲刚度，其表达式为：

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{4.2}$$

式中，E 和 ν 分别是平板材料的杨氏模量和泊松比；h 则是平板的厚度，如图 4.1 所示。

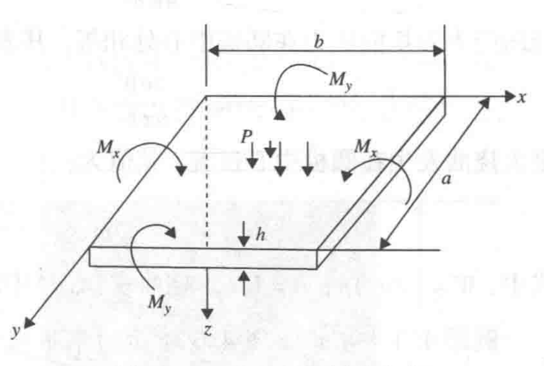


图 4.1　一个矩形平板的弯曲

弯矩在 x 轴和 y 轴(参见图 4.1)的分量以及弯曲应力可以通过对横向挠曲 $w(x, y)$ 的计算得到，而 $w(x, y)$ 则可以通过求解方程(4.1)得到，上述过程如下所示。

各个弯矩分量分别为：

$$M_x=-D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\nu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \tag{4.3a}$$

$$M_y=-D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \tag{4.3b}$$

$$M_{xy}=D(1-\nu)\frac{\partial^2 w}{\partial x\,\partial y} \tag{4.3c}$$

各个弯曲应力的分量分别为：

$$(\sigma_{xx})_{\max}=\frac{6(M_x)_{\max}}{h^2} \tag{4.4a}$$

$$(\sigma_{yy})_{\max}=\frac{6(M_y)_{\max}}{h^2} \tag{4.4b}$$

$$(\sigma_{xy})_{\max} = \frac{6(M_{xy})_{\max}}{h^2} \tag{4.4c}$$

平板的横向挠曲 $w(x,y)$ 可以通过在合适的边界条件下求解方程(4.1)获得，通过它再利用式(4.3)就可以计算出弯矩，因此最大弯曲应力可以利用最大弯矩通过式(4.4)计算得到。方程(4.1)的求解通常是一件冗长乏味的事情，好在这项工作目前在个人电脑以及MATLAB或MATHCAD等软件包的协助下已经变得十分容易了。

一般的横梁受到弯曲之后产生的最大应力或挠曲的简化计算公式可以从几篇参考文献中找到[Avallone和Baumeister, 1996; Roark, 1965]。对于平板也可以得到类似的简化计算公式[Roark, 1965]。下面给出的就是3种情况。根据这些计算得到的形变结构中最大应力的幅值及其产生的位置，工程师们可以安排相应的测量站点以便获得最大的信号输出。

4.2.1　周边固定圆板的弯曲

下面给出的表达式是按照一个半径为 a 和厚度为 h 的圆板求得的解[Roark, 1965]。该圆板由于受到均匀分布的压力载荷 p 而发生弯曲(参见图4.2)。

最大径向应力位于圆板的边缘，其表达式为：

$$(\sigma_{rr})_{\max} = \frac{3W}{4\pi h^2} \tag{4.5a}$$

最大周向(切向)应力也位于圆板的边缘，其表达式为：

$$(\sigma_{\theta\theta})_{\max} = \frac{3\nu W}{4\pi h^2} \tag{4.5b}$$

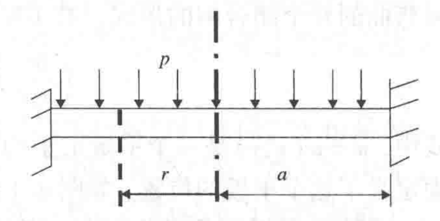


图4.2　受到均匀压力载荷的圆板

径向应力和切向应力在圆板中心处相等，其表达式为：

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{3\nu W}{8\pi h^2} \tag{4.6}$$

最大挠曲发生在圆板中心位置，其值为：

$$w_{\max} = -\frac{3W(m^2-1)a^2}{16\pi E m^2 h^3} \tag{4.7}$$

式中，$W=(\pi a^2)p$，$m=1/\nu$。挠曲式(4.7)中的负号表示其方向向下。

例题4.1　求出如图4.3所示的采用硅制作的微压力传感器的圆形振动膜的最小厚度。振动膜的直径为600 μm，其周边被刚性固定在硅芯片上。振动膜的设计能够承受20 MPa的压力，且不超出其7000 MPa的塑性屈服强度。硅振动膜的杨氏模量是 $E=190\,000$ MPa，泊松比 $\nu=0.25$。

解答：根据方程(4.5a)，薄板的厚度可以表示为：

$$h = \sqrt{\frac{3W}{4\pi(\sigma_{rr})_{\max}}}$$

或者也可以根据方程(4.5b)得到：

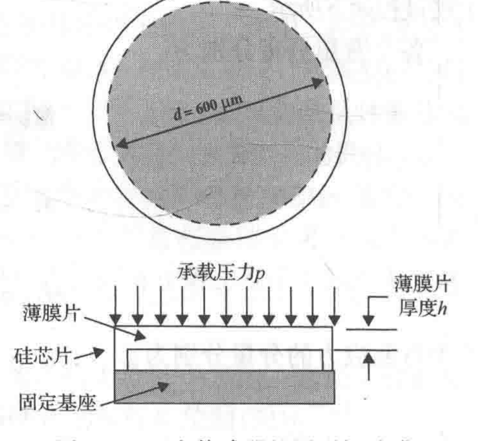


图4.3　压力传感器的圆形振动膜

$$h = \sqrt{\frac{3\nu W}{4\pi(\sigma_{\theta\theta})_{\max}}}$$

由于我们在设计上述振动膜时，必须使得其承受的最大应力低于材料的塑性屈服强度，即$(\sigma_{rr})_{\max} \leqslant \sigma_y = 7000\ \text{MPa}$，且$(\sigma_{\theta\theta})_{\max} \leqslant \sigma_y = 7000\ \text{MPa}$，同样也因为泊松比 $\nu = 0.25 < 0$，所以很显然我们应该使用上面关于振动膜厚度 h 的两个表达式中的第一个。

上述表达式中的等价载荷 W 可以估算为：

$$W = (\pi a^2)P = 3.14 \times (300 \times 10^{-6})^2 \times (20 \times 10^6) = 5.652\ \text{N}$$

再根据方程(4.5a)可得：

$$h = \sqrt{\frac{3 \times 5.652}{4 \times 3.14 \times (7000 \times 10^6)}} = 13.887 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

即硅振动膜的最小厚度为 $h = 13.887\ \mu\text{m}$。

硅振动膜的最大挠曲 $w_{\max}$ 可以根据方程(4.7)求得：

$$w_{\max} = -\frac{3W(m^2-1)a^2}{16\pi E m^2 h^3}$$

式中，当 $m = 1/\nu = 1/0.25 = 4.0$ 时可得：

$$w_{\max} = -\frac{3 \times 5.652(16-1) \times (300 \times 10^{-6})^2}{16 \times 3.14 \times 190\,000 \times 10^6 \times 16 \times (13.887 \times 10^{-6})^3} = -55.97\ \mu\text{m}$$

4.2.2 四边固定矩形板的弯曲

对于这种情形(如图 4.4 所示)，有关挠曲的一个闭合解已经在参考文献[Timoshenko 和 Woinowsky-Krieger，1959]中给出了，其简化解也可以在参考文献[Roark，1965]中获得。

最大应力发生在矩形长边的中心，其表达式为：

$$(\sigma_{yy})_{\max} = \beta \frac{pb^2}{h^2} \tag{4.8}$$

而平板的最大挠曲则出现在其质心位置处，其表达式为：

$$w_{\max} = \alpha \frac{pb^4}{Eh^3} \tag{4.9}$$

方程(4.8)和方程(4.9)中的系数 α 和 β 的数值由表 4.1 给出。

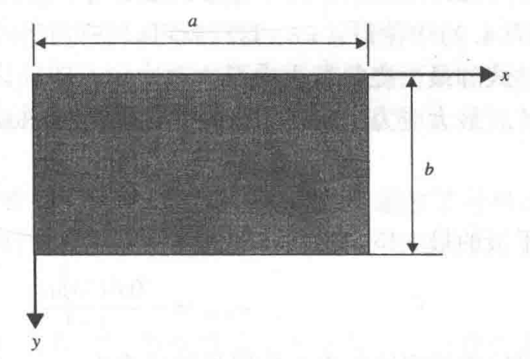


图 4.4　一个矩形平板的弯曲情形

表 4.1　矩形平板中用于计算最大应力和最大挠曲的系数值

a/b	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞
α	0.0138	0.0188	0.0226	0.0251	0.0267	0.0277	0.0284
β	0.3078	0.3834	0.4356	0.4680	0.4872	0.4974	0.5000

例题 4.2　如图 4.4 所示，一个矩形振动膜的边长分别为 $a = 752\ \mu\text{m}$ 和 $b = 376\ \mu\text{m}$。这两个边长尺寸使得该矩形膜和例题 4.1 的圆形振动膜具有相同的面积。矩形振动膜的厚度、外加的压力以及材料的属性都与例题 4.1 中的情形完全相同。求该振动膜的最大应力和最大挠曲。

解答：该矩形的边长比为 $a/b=2.0$，由此可从表4.1中查得 $\alpha=0.0277$，$\beta=0.4974$。按照题意我们可取振动膜的厚度为 $h=13.887\ \mu m$、外加压力为 $p=20$ MPa 来计算该振动膜的最大应力和最大挠曲。

因此可以利用方程(4.8)来计算最大应力：

$$(\sigma_{yy})_{\max}=\beta\frac{pb^2}{h^2}=0.4974\frac{(20\times10^6)(376\times10^{-6})^2}{(13.887\times10^{-6})^2}=7292.8\times10^6\ \text{Pa}$$

即 $(\sigma_{yy})_{\max}=7292.8$ MPa。这个数值已经超出了硅的塑性屈服强度 $\sigma_y=7000$ MPa，因此这种情况可以被解释为"不安全的"。

振动膜的最大挠曲度可以根据方程(4.9)求得：

$$\begin{aligned}w_{\max}&=\alpha\frac{pb^4}{Eh^3}=\alpha\frac{pb}{E}\left(\frac{b}{h}\right)^3\\&=\frac{0.0277\times(20\times10^6)\times376\times10^{-6}}{190\,000\times10^6}\left(\frac{376\times10^{-6}}{13.887\times10^{-6}}\right)^3\\&=21.76\times10^{-6}\ \text{m}\end{aligned}$$

振动膜中心位置处的最大挠曲是 $w_{\max}=21.76\ \mu m$，该数值小于圆形振动膜中的最大挠曲。

4.2.3 四边固定正方形板的弯曲

正方形的振动膜在微压力传感器中是很常见的(如图2.9所示)。这种几何结构之所以受到工业界的青睐，是因为在具有相同面积的振动膜中，这种形状的振动膜比起其他几何结构的振动膜能够产生最大的应力和最强的信号输出。

图4.5所示为一种典型的正方形板。

在矩形板中令两个邻边长度相等，也就是在方程(4.8)和方程(4.9)中使得 $a=b$，这样就可以获得正方形平板的最大应力表达式和最大挠曲表达式。

最大应力出现在各边的中心位置处[Roark, 1965]：

$$\sigma_{\max}=\frac{0.308pa^2}{h^2} \tag{4.10}$$

平板的最大挠曲出现在平板的中心位置处：

$$w_{\max}=-\frac{0.0138pa^4}{Eh^3} \tag{4.11}$$

图4.5 正方形平板的弯曲

可以推导出平板中心位置处的应力为：

$$\sigma=\frac{6p(m+1)a^2}{47mh^2} \tag{4.12}$$

平板中心位置处的应变度为：

$$\varepsilon=\frac{1-\nu}{E}\sigma \tag{4.13}$$

例题4.3 一个边长为532 μm的正方形硅振动膜，受到与例题4.1及例题4.2中相同的压力载荷 $p=20$ MPa 的作用，振动膜的厚度也相同，为13.887 μm。所有的材料属性也都与例题4.1中相同。求在该外加压力作用下振动膜中的最大应力和最大挠曲。

解答： 取 $a=532\times10^{-6}$ m，$h=13.887\times10^{-6}$ m 和 $p=20\times10^{6}$ Pa，则振动膜中的最大应力可利用方程(4.10)求得：

$$\sigma_{\max}=\frac{0.308pa^2}{h^2}=\frac{0.308\times(20\times10^6)(532\times10^{-6})^2}{(13.887\times10^{-6})^2}=9040\times10^6\ \text{Pa}$$

即 $\sigma_{\max}=9040$ MPa，这个数值已经远大于硅芯片的屈服强度 $\sigma_y=7000$ MPa。

振动膜的最大挠曲可以通过方程(4.11)求得：

$$w_{\max}=-\frac{0.0138pa^4}{Eh^3}=-\frac{0.0138pa}{E}\left(\frac{a}{h}\right)^3$$
$$=-\frac{0.0138(20\times10^6)\times532\times10^{-6}}{190000\times10^6}\left(\frac{532\times10^{-6}}{13.887\times10^{-6}}\right)^3$$
$$=-43\times10^{-6}\ \text{m}$$

即 $w_{\max}=43$ μm。

由于振动膜的面积、厚度以及外加的压力都是完全相同的，因此可以对例题 4.1、例题 4.2 和例题 4.3 中求得的结果总结归纳为下表：

振动膜的几何形状	最大应力(MPa)	最大挠曲(μm)
圆形	7000	55.97
矩形($a/b=2.0$)	7293	21.76
正方形	9040	43.00

很显然我们从上表总结的数据中可以看到，按照传统机械设计的观点来衡量，圆形振动膜的表现情况最好，因为在 3 种不同的情形中它给出的平板中的最大诱生应力是最低的。而正方形的振动膜在这 3 种情形中给出的最大诱生应力是最高的。无论是从应力的角度还是从挠曲的角度来看，正方形振动膜通常都被认为是最不理想的一种几何结构。但是正如在 2.2.5 节中介绍的那样，弯曲的振动膜引起的高应力和大挠曲可以导致高的信号输出。因此正方形的振动膜仍然是当今微型压力传感器产业中采用的一种最常见的几何结构。

读者可能还会注意到在例题 4.2 和例题 4.3 中振动膜的最大诱生应力已经超过了材料的屈服强度。设计工程师可以按照第 11 章介绍的方法，通过引入加固结构来降低上述应力，也可以通过减小振动膜的尺寸来降低应力。

例题 4.4　计算出如图 4.6(a)所示的用于微型压力传感器的正方形振动膜的挠曲和最大应力，该振动膜的几何结构和尺寸如图 4.6(b)所示。预期外加到微型压力传感器上的最大压力载荷为 $p=70$ MPa。该硅振动膜的材料属性为：杨氏模量 $E=190\ 000$ MPa，泊松比 $\nu=0.25$。

解答： 事实上，整个硅振动膜的顶部上表面都承受了外加的压力。但是我们假设振动膜中只有面积为 $783\times783\ \mu\text{m}^2$ 的中心区部分是可以发生形变的。因此该硅振动膜的主动承载区部分仅为边长 $a=783$ μm 或 783×10^{-6} m 的正方形，其厚度为 $h=266$ μm。振动膜上的最大应力可以通过求解方程(4.10)来获得：

$$\sigma_{\max}=\frac{0.308\times70\times10^6\times(783\times10^{-6})^2}{(266\times10^{-6})^2}=186.81\ \text{MPa}$$

该最大应力出现在各边的中点位置处，而最大挠曲则出现在振动膜的中心位置处，其数值为：

$$w_{\max} = -\frac{0.0138 \times 70 \times (783 \times 10^{-6})^4}{190\,000 \times (266 \times 10^{-6})^3} = -10\,153 \times 10^{-11}\ \text{m 或 } -0.1015\ \mu\text{m}$$

从上述计算结果中我们很容易看到，振动膜中的最大应力要远远低于材料的屈服强度，即7000 MPa。最大挠曲也比较小，仅为0.1015 μm，这是因为振动膜上实际承受压力的面积也比较小的缘故。

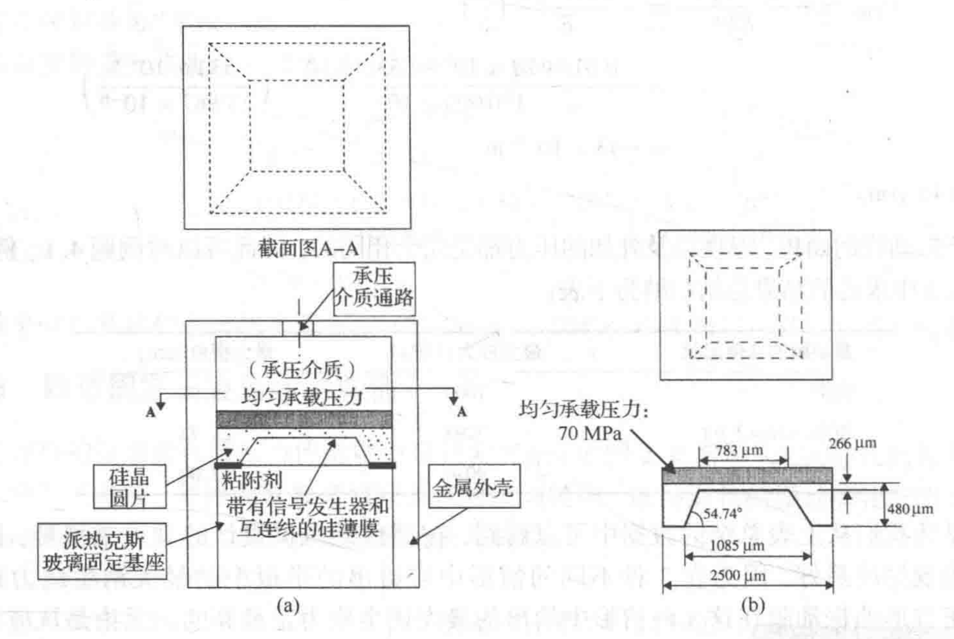


图4.6 硅振动膜上的应力和形变：(a)正面承受压力的传感器；(b)硅振动膜的尺寸

4.3 机械振动

机械振动理论是微加速度计设计的基础。有关这类器件的实际应用，例如用于汽车安全气囊展开系统中的惯性传感器，我们已经在第1章中对其进行了介绍，第2章中对其工作原理也进行了介绍。本节将回顾机械振动的一些基本原理以及它们在微加速度计设计中的应用。

4.3.1 基本公式

最简单的机械振动系统是如图4.7(a)所示的质量块-弹簧系统。质量块悬挂在弹性系数为k的弹簧下，由于施加在其上的微小瞬态扰动的影响，质量块就会偏离其初始的平衡位置而发生振动。设质量块在t时刻的位移为$X(t)$，通过求解下述由牛顿第二定律导出的运动方程即可获得质量块的位移$X(t)$：

$$m\frac{\mathrm{d}^2 X(t)}{\mathrm{d}t^2} + kX(t) = 0 \tag{4.14}$$

方程(4.14)的通解具有下述形式：

$$X(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) \tag{4.15}$$

式中，振动质量块的圆频率可以导出为：

$$\omega = \left(\frac{k}{m}\right)^{1/2} \tag{4.16}$$

而 C_1和 C_2则是由合适的初始条件所决定的任意常数。

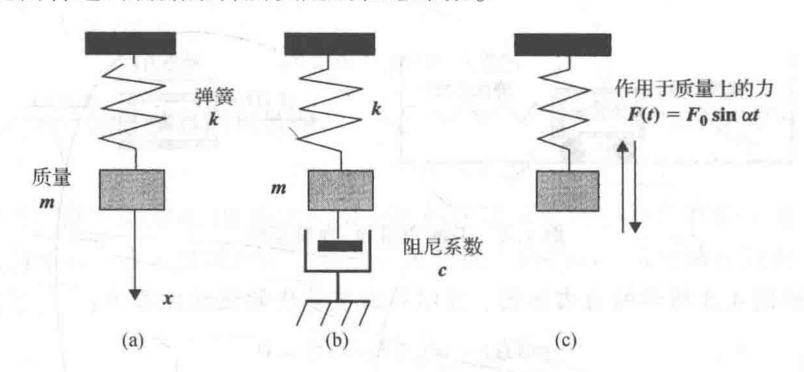


图 4.7　简单的机械振动系统：(a)质量块–弹簧系统的自由振动；(b)质量块–弹簧–阻尼器系统的自由振动；(c)质量块–弹簧系统的受迫振动

质量块的振动频率由下式给出：

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

方程(4.16)中的圆频率 ω 常常被看作是整个系统的固有频率，在评估包括微器件在内的各种固体结构的谐振特性方面，这是经常用到的一个非常重要的物理量，它的单位是弧度每秒(rad/s)。

例题 4.5　一个质量为 10 mg 的质量块悬挂在一个弹性系数为 $k = 6 \times 10^{-5}$ N/m 的弹簧上，该质量块–弹簧系统的振动是在一个幅度为 $\delta_{st} = 5$ μm 的向下拖拉的作用下起动的。试求该质量块振动的幅值和频率。

解答：本例题中相关物理条件的描述符合方程(4.14)表示的情况，其初始位移为：

$$X(0) = \delta_{st} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

并且其初始速度为：

$$\dot{X}(0) = 0$$

根据上述条件，当两个待定常数的取值分别为 $C_2 = 0$，$C_1 = \delta_{st} = 5 \times 10^{-6}$ m 时，式(4.15)所表示的通解即为本例题的解。

因此振动的质量块在任意给定时刻 t 的振幅为：

$$X(t) = (5 \times 10^{-6}) \cos \omega t \tag{4.17}$$

式中的圆频率 ω 可由方程(4.16)求得：

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{6 \times 10^{-5}}{10^{-5}}} = 2.45 \text{ rad/s}$$

对应的振动频率为：

$$f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{2.45}{2\times 3.14}=0.39\ \text{cps (cycle/s)}$$

上述质量块-弹簧系统的固有频率 ω_n 与其圆频率相同，即 $\omega_n=2.45$ rad/s。

例题4.6 计算如图4.8所示的一个平衡质量块-弹簧系统振动的幅值和频率，题中各物理参数值均与例题4.5相同，且两个弹簧的弹性系数也相同，即 $k_1=k_2$。

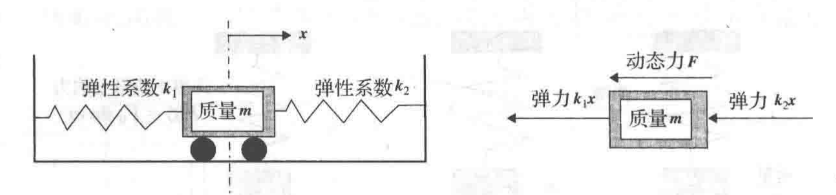


图4.8 平衡质量块-弹簧系统

解答： 根据图4.8所示的自由体图，可以导出质量块的运动方程为：

$$m\ddot{X}(t)+(k_1+k_2)X(t)=0 \tag{4.18}$$

方程(4.18)的解与方程(4.14)的解类似，只是其中弹簧的弹性系数为 $k=k_1+k_2$。

因此，本例题中质量块的振幅与方程(4.17)中的振幅相同，但是本例题中的圆频率，亦即固有频率则变为：

$$\omega_n=\sqrt{\frac{k_1+k_2}{m}}=\sqrt{\frac{(6+6)\times 10^{-5}}{10^{-5}}}=3.464\ \text{rad/s}$$

我们将会看到，对于一个质量块-弹簧系统的自由振动来说，方程(4.15)所表示的解将会以一个恒定的最大振幅而振动，亦即质量块围绕其初始平衡位置的振动会随着时间的推移而无限延续，这显然是不切实际的。

现在假设我们给系统中引入一个阻尼器，如图4.7(b)所示，该阻尼器会对振动质量块的运动形成一个阻力或者阻尼效应，这样就会导致振动幅度的减小。

我们假定阻尼器的阻尼系数为 c，它将产生一个与振动质量块的速度成比例的减速阻尼力，则方程(4.14)所表示的质量块运动方程将被修正为：

$$m\frac{\mathrm{d}^2X(t)}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}+kX(t)=0 \tag{4.19}$$

根据阻尼参数大小的不同，方程(4.19)质量块的瞬时位置 $X(t)$ 可以取下述3种情况中的一种，其中阻尼参数的定义为：$\lambda=c/(2m)$。

情况1 $\lambda^2-\omega^2>0$，过阻尼情况：

$$X(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t}\left(C_1\mathrm{e}^{t\sqrt{\lambda^2-\omega^2}}+C_2\mathrm{e}^{-t\sqrt{\lambda^2-\omega^2}}\right) \tag{4.20a}$$

式中，C_1 和 C_2 均为任意常数；而 ω 则由方程(4.16)确定。

图4.9展示了方程(4.20a)给出的解的变化情况。从这些曲线中，我们可以看到，在这种情况下，质量块的往复振动实际上已经不复存在，并且质量块的振幅也从其初始位置处迅速下降。因此，对于各类机械和器件的设计来说，包括对于那些易于产生过量振动的微系统设计而言，过阻尼效应通常都是一种希望出现的情形。在这类微器件的设计过程中，设计工程师必须选择一个合适的阻尼器。

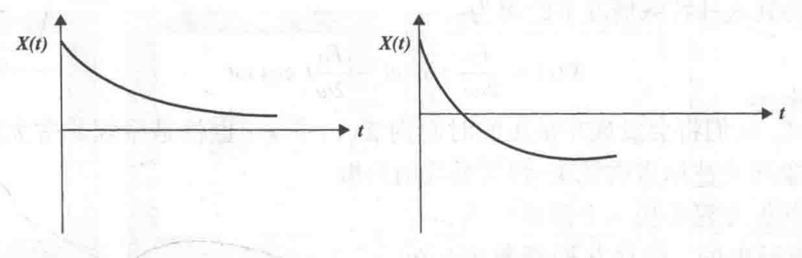


图4.9　过阻尼的情形

情况2　$\lambda^2-\omega^2=0$，临界阻尼情况：

$$X(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t}(C_1+C_2t) \tag{4.20b}$$

上面这个解的曲线如图4.10所示。图中的曲线显示振动的幅度在刚开始时减小，然后在最终的衰减前还有一点轻微的增大。和过阻尼情况不同的是，这种情况通常不是一种我们希望出现的情形。

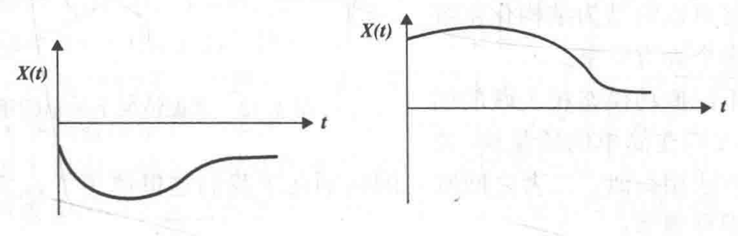


图4.10　临界阻尼的情形

情况3　$\lambda^2-\omega^2<0$，欠阻尼情况：

$$X(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t}(C_1\cos\sqrt{\omega^2-\lambda^2}t+C_2\sin\sqrt{\omega^2-\lambda^2}t) \tag{4.20c}$$

图4.11展示了系统欠阻尼的情形。从图4.11中可以看到，尽管质量块的振幅在不断衰减，但是它仍然在一个相当长的时间内保持振动的状态。这种情况对于机械设计而言显然是最不希望出现的一种情形。

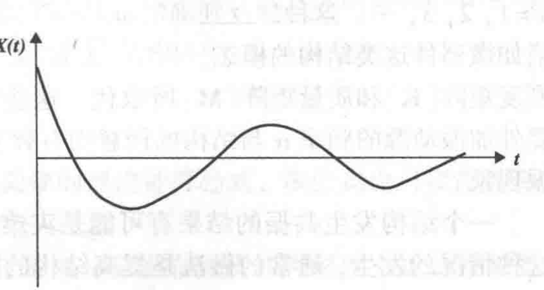


图4.11　欠阻尼的情形

4.3.2　共振

我们来考虑这样一种情况，图4.7(a)所示的简单质量块-弹簧系统受到一个谐振频率为α的外力的作用，如图4.7(c)所示。频率α在受迫振动中通常被称为策动力的频率。

关于质量块的瞬态位置$X(t)$的运动方程可以表示为：

$$m\frac{\mathrm{d}^2X(t)}{\mathrm{d}t^2}+kX(t)=F_0\sin(\alpha t) \tag{4.21}$$

式中，F_0是所加外力的最大幅值。

通过方程(4.21)可以求解出$X(t)$为：

$$X(t)=\frac{F_0}{\omega(\omega^2-\alpha^2)}(-\alpha\sin\omega t+\omega\sin\alpha t) \tag{4.22}$$

从方程(4.22)中可以看到$X(t)\to0/0$；即当$\alpha=\omega$时，$X(t)$的值变得不确定。但是根据罗比

达法则，可以得到这种特殊情况下的解为：

$$X(t)=\frac{F_0}{2\omega^2}\sin\omega t-\frac{F_0}{2\omega}t\cos\omega t \tag{4.23}$$

当 $\alpha=\omega$ 时，我们将会发现在很短的时间内 $X(t)\to\infty$（也就是振幅非常大），如图4.12所示。这种现象通常被称为质量块-弹簧系统的共振。

尽管上述共振方程是从一个简单的质量块-弹簧系统导出的，但是共振现象也存在于其他形式的结构中，只要外加作用力的频率 α 等于结构的固有频率 ω。对于复杂几何形状的微器件来说，理论上存在无穷多个可以发生共振现象的模态，而每一个这样的模态都与共振状态下器件的一个独特形变的几何形状相关联。这些多模态结构的共振最终可以归结为结构化系统内部具有的无穷多个固有频率。

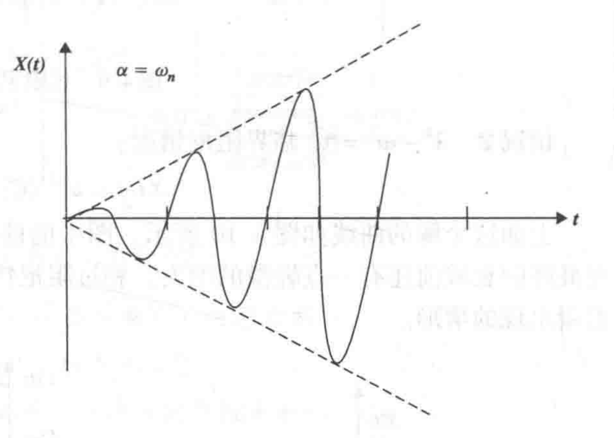


图4.12　共振情况下振幅的迅速增加

用来确定与不同振动模态相关联的固有频率的方法与我们在简单的质量块-弹簧系统中使用的方法相类似。二者之间唯一的区别在于我们这里使用了 ω_n 来表征一个复杂几何结构的多个固有频率：

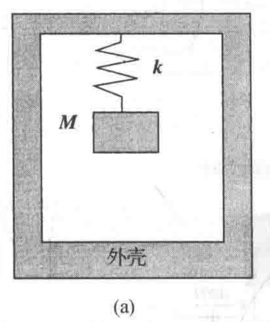
$$\omega_n=\sqrt{\frac{K}{M}} \tag{4.24}$$

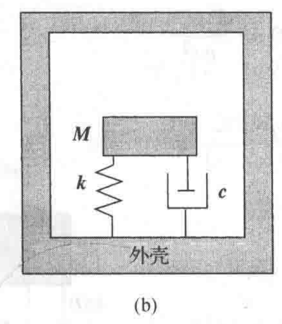
方程(4.24)中的频率 ω_n 称为某个结构在第 n 阶模态下的固有频率，其中 n 是模态数，$n=1, 2, 3, \cdots$。这种涉及到确定 $\omega_n(n=1, 2, 3, \cdots)$ 的分析方法称为结构的模态分析。在诸如微器件这类结构的模态分析中，方程(4.24)中的刚度常数 K 和质量 M 将分别被结构的刚度矩阵[**K**]和质量矩阵[**M**]所取代。这些矩阵都是可以通过有限元分析方法获得的。只要外加振动源的频率 α 与结构的任意固有频率 $\omega_n(n=1, 2, 3, \cdots)$ 相等，结构中就会发生共振现象。

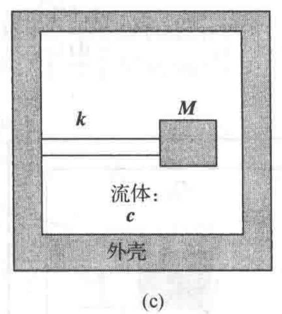
一个结构发生共振的结果有可能是灾难性的。因此，结构的工程设计总是要设法避免这种情况的发生，通常的做法是提高结构的固有频率，以便使得所有可以预见到的由外加策动力诱发的振动频率都不会达到哪怕是最低模态的固有频率。在第2章介绍的小型化麦克风的设计中就要求做到这一点。但是对于许多其他类型的微器件设计来说，情况可能又有所不同，例如对于同样是第2章介绍的微加速度计与声学波传感器的设计来说，采用接近仪器固有频率的振动能导致质量块更大的振幅，因而也就能够提供更大的和更灵敏的输出信号。

4.3.3　微加速度计

加速度计的工作原理可以通过一个连接到弹簧上的简单质量块来展示，该弹簧再与一个外壳相连接，如图4.13(a)所示。加速度计中使用的质量块经常被称为测振质量或者检测质量。在大多数情况下，系统中还会包含一个阻尼器来提供所需的阻尼效果。一个阻尼系数为 c 的阻尼器通常以并联的形式与弹簧一起连接到质量块上，如图4.13(b)所示。







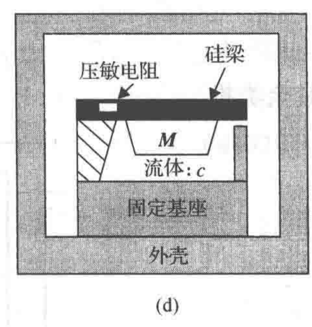


图4.13 加速度计结构示意图：(a)弹簧-质量块；(b)弹簧-质量块-阻尼器；(c)梁-质量块；(d)粘贴在梁上的质量块

对于小型化的加速度计来说，图4.13(a)和图4.13(b)中的弹簧线圈和阻尼器会占用太多的空间，因此出现了几种变通的元件排布方式，如图4.13(c)[Petersen，1982；Putty 和 Chang，1989]和图4.13(d)[Barth，1990]所示。微加速度计的基本结构包括一个外壳，这个外壳或者像图4.13(c)所示的那样包含一个悬臂梁和一个附着在其上的质量块，或者像图4.13(d)所示的那样包含一个悬挂在细梁或薄膜上的质量块。在梁-质量块或者膜-质量块系统中，弹性梁或者膜取代了弹簧，而腔中密封的空气或流体则提供了阻尼效果。

另外一种更为紧凑的微加速度计的变通排布方式如图2.35所示，其中梁-质量块被连接到两个由细的硅框架组成的链状弹簧上。当梁-质量块系统承受到纵向的加速度或者减速度时，它就会向相同的方向发生移动。

如果把一个加速度计的外壳与一个振动的机器或器件相连接，当这个机器或器件受到动力载荷或冲击载荷时，质量块(称为检测质量)就会发生振动。加速度计中振动质量块的加速度可以借助电位计或者其他类似的手段来测量其瞬态位置而得到。质量块的振幅与外壳的加速度之间在理论上的相关性可以从很多论述振动的教科书上找到。

4.3.4 加速度计的设计理论

在本节中将给出有关加速度计中检测质量振幅的理论计算公式，该公式也可以用作微加速度计的设计基础。

图4.14(a)展示了一种典型的加速度计，它是由一个依靠弹簧和阻尼器支承的检测质量构成的。这个振动系统的外壳被固定在一个振动的机器上，该机器的振幅 $x(t)$ 可以用一个简谐振动的方程来描述，其数学表达式为：

$$x(t) = X\sin\omega t \tag{4.25}$$

式中，X 是底座的最大振幅；t 为时间；ω 是底座振动的圆频率。

如果指定 $y(t)$ 为质量块 m 偏离其初始平衡位置的振幅，那么质量块 m 相对于底座的相对运动或净运动就可以表示为：

$$z(t) = y(t) - x(t) \tag{4.26}$$

从上式可以得到：

$$\dot{z}(t) = \dot{y}(t) - \dot{x}(t) \quad \ddot{z}(t) = \ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)$$

其中，

$$\dot{z}(t)=\frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t}\quad \ddot{z}(t)=\frac{\mathrm{d}^2z(t)}{\mathrm{d}t^2}$$

其余类推。

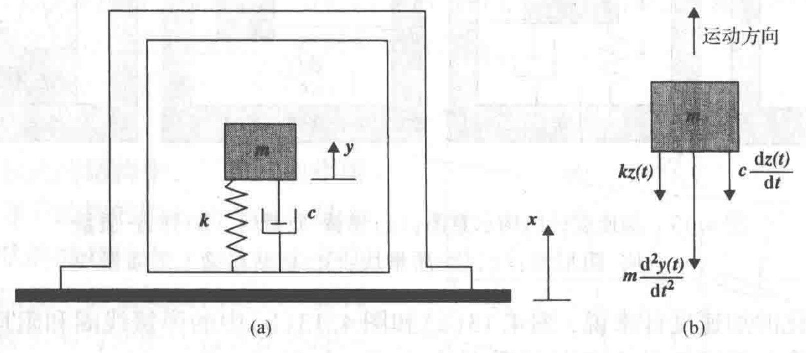


图4.14　一个典型的加速度计：(a)加速度计示意图；(b)检测质量的受力

根据图4.14(b)所示的受力情况，可以从牛顿动力平衡定律导出检测质量的运动方程为：

$$-kz(t)-c\dot{z}(t)-m\ddot{y}(t)=0 \tag{4.27}$$

将关系式 $\ddot{y}(t)=\ddot{z}(t)+\ddot{x}(t)$ 代入方程(4.27)可以得到：

$$m\ddot{z}(t)+c\dot{z}(t)+kz(t)=-m\ddot{x}(t) \tag{4.28}$$

如方程(4.25)所示，由于连接的机器以振幅为 $x(t)=X\sin\omega t$ 进行振动，因此方程(4.28)将变成：

$$m\ddot{z}(t)+c\dot{z}(t)+kz(t)=mX\omega^2\sin\omega t \tag{4.29}$$

方程(4.29)是一个二阶非齐次微分方程，它的解包括两个部分，即通解(CS)部分和特解(PS)部分。

方程(4.29)的通解可以从该方程对应的齐次方程来求得：

$$m\ddot{z}(t)+c\dot{z}(t)+kz(t)=0$$

该齐次方程与方程(4.19)类似，其解的形式在方程(4.20a、b和c)中已经给出。对这3种情况下的通解，振幅 $z(t)$ 如图4.9、图4.10和图4.11所示。

对于加速度计的设计比较关键的部分是方程(4.29)的特解。为了求得这个特解，可以假设：

$$z(t)=Z\sin(\omega t-\phi) \tag{4.30}$$

式中，ϕ 是输入运动 $x(t)=X\sin\omega t$ 与相对运动 $z(t)$ 之间的相位差。

把方程(4.30)代入方程(4.29)中，就可以确定质量块相对运动的最大幅值 Z，它可以表示为以下两种形式：

$$Z=\frac{\omega^2X}{\sqrt{\left(k/m-\omega^2\right)^2-(\omega c/m)^2}} \tag{4.31a}$$

$$\phi=\arctan\frac{\omega c/m}{k/m-\omega^2} \tag{4.31b}$$

上面的解也可以表示为另一种形式：

$$Z = \frac{\omega^2 X}{\omega_n^2\sqrt{\left[1-(\omega/\omega_n)^2\right]^2+\left[2h(\omega/\omega_n)\right]^2}} \tag{4.32a}$$

$$\phi = \arctan\frac{2h(\omega/\omega_n)}{1-(\omega/\omega_n)^2} \tag{4.32b}$$

式中，

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

为加速度计在无阻尼条件下自由振动的固有频率，而

$$h = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_c}$$

则是微加速度计中阻尼介质的阻尼系数与临界阻尼系数 $c_c = 2m\omega_n$ 之间的比值[可以参见方程(4.20b)所表示的情况]。

我们可能会很容易注意到，当系统接近共振状态时，也就是 $\omega \to \omega_n$ 时，从方程(4.32a)中可以得到振幅 $Z \to X/(2h)$。由于 h 与阻尼效应相关，$h=0$ 时的自由振动将会导致质量块的振幅无限趋于大。因此阻尼参数 h 的选取对于加速度计的设计是至关重要的。

图4.15定性地展示了阻尼效应对质量块振幅的影响，图中所示的曲线是根据方程(4.32a)绘制出来的。从图中可以看到，当系统的振动频率 ω 远大于加速度计的固有频率时，即 $\omega \gg \omega_n$ 时，最大相对振幅 Z 近似等于检测质量的最大振幅，即 $Z=X$。图4.15中有关 Z/X 相对于 ω/ω_n 和 $\omega_n Z/\ddot{X}$ 更为精确的变化曲线可以在一些论述机械振动的教科书中找到。这些曲线图在设计加速度计时是非常有用的。另一方面，如果机器的振动频率 ω 远小于微加速度计的固有频率，即 $\omega \ll \omega_n$，我们将会发现存在以下关系[Dove 和 Adams，1964]：

$$Z \approx -\frac{a_{\text{base,max}}}{\omega_n^2} \tag{4.33}$$

式中，$a_{\text{base,max}}$ 是加速度计所依附机器的最大加速度。

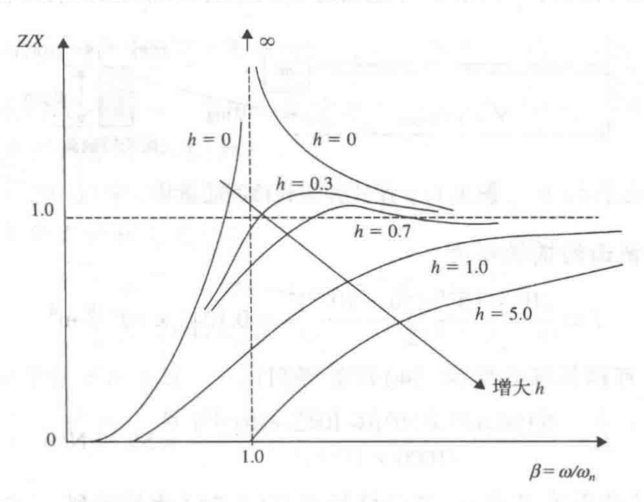


图4.15　一个加速度计的振幅变化情况

例题4.7　图4.13(c)所示是一个由梁-质量块构成的微加速度计，忽略其阻尼效应，试推导出用于估算该微加速度计固有频率的公式。

解答：我们可以把图4.13(c)所示的结构理想化为一个简单的悬臂梁，悬臂梁在其自由端承受了一个等效的集中载荷 $W = Mg$，如图4.16所示，其中，W 是质量块 M 的重量，而 g 则是重力加速度。

我们来回顾一下梁的最大挠曲，$\delta = WL^3/(3EI)$，其中 E 和 I 分别是梁材料的杨氏模量和梁横截面的面积惯性矩。

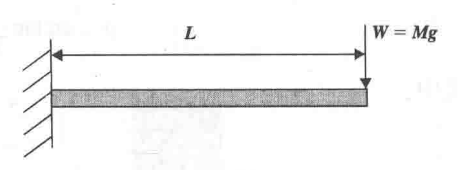


图4.16　梁式弹簧

由于材料的弹性系数 k 被定义为载荷与挠曲之比，因此可以得到梁的等效弹性系数为：

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{3EI}{L^3} \tag{4.34}$$

根据上面的等效弹性系数可以求出微加速度计固有频率 ω_n 的近似值为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} = \sqrt{\frac{3EI}{ML^3}} \tag{4.35}$$

式中，M 是附着在梁上的检测质量块的质量，而梁自身的质量则被忽略了。

需要提醒读者的是，上面的例子只是一个近似的估算，由于很多微加速度计是由悬挂在悬臂板上的质量块构成的，而不是由悬挂在悬臂梁上的质量块构成的，因此根据简单梁理论导出的等效弹性系数显然不适用于这些情况。已经有人制造出了一种由附着在悬臂板上的检测质量块构成的硅基微加速度计[Bryzek 等人，1992]，它包含一个3.4 mm×3.4 mm×1.25 mm的振动膜(即悬臂板)。在悬臂板的根部位置利用扩散工艺制作的压电电阻可以将质量 M 的位移以及振动膜的加速度与振动膜的应变之间建立相应的联系。在该器件中还安装了两个过量程限制器以避免由于误操作而可能给传感器带来的损伤。由于加速度计具有比较复杂的几何结构，通常都需要采用有限元方法来确定器件的固有频率。

例题4.8　图4.17所示是一个微加速度计中的悬臂梁单元，该悬臂梁是由杨氏模量为190 000 MPa的硅材料制成的。试求悬臂梁的等效弹性系数 k 和固有频率 ω_n。

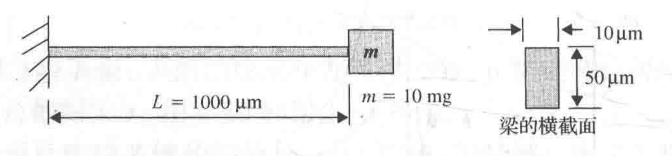


图4.17　梁式弹簧和检测质量块

解答：悬臂梁横截面的惯性矩为：

$$I = \frac{(10\times10^{-6})(50\times10^{-6})^3}{12} = 0.1042\times10^{-18}\ \text{m}^4$$

悬臂梁的弹性系数 k 可以根据方程(4.34)计算得到：

$$k = \frac{3(190\,000\times10^6)(0.1042\times10^{-18})}{(1000\times10^{-6})^3} = 59.39\ \text{N/m}$$

梁式弹簧-质量块系统的固有频率 ω_n 可以根据方程(4.24)计算得到：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{59.39}{10^{-5}}} = 2437\ \text{rad/s}$$

在上述计算中，质量 m 的单位均采用千克(kg)。

另外一种类型的梁式弹簧也可以应用于微加速度计的设计中。对于如图4.18(a)所示的这种中心加载梁，读者很容易推导出其等效的弹性系数，对于简支梁式弹簧，$k=(48EI)/L^3$，而对于端部固支梁式弹簧，$k=(192EI)/L^3$。

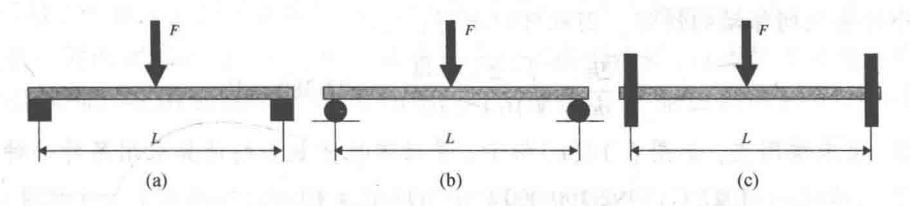


图4.18　用于微加速度计的梁式弹簧：(a)梁式弹簧；(b)末端简支；(c)末端固支

例题4.9　计算确定一个与图2.35所示结构相类似的力平衡型微加速度计的固有频率，该结构经过理想化之后的形式如图4.19所示，其中梁式弹簧的尺寸如图4.20所示。

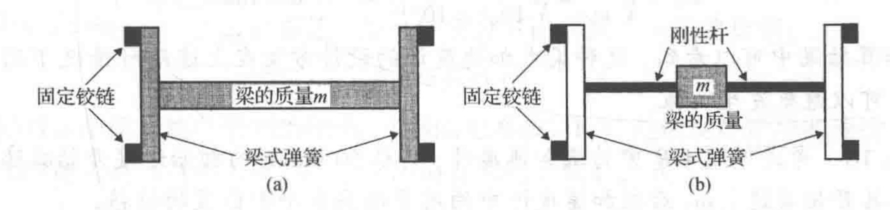


图4.19　力平衡型微加速度计的基本结构：(a)梁–质量块–弹簧系统；(b)经过理想化之后的情况

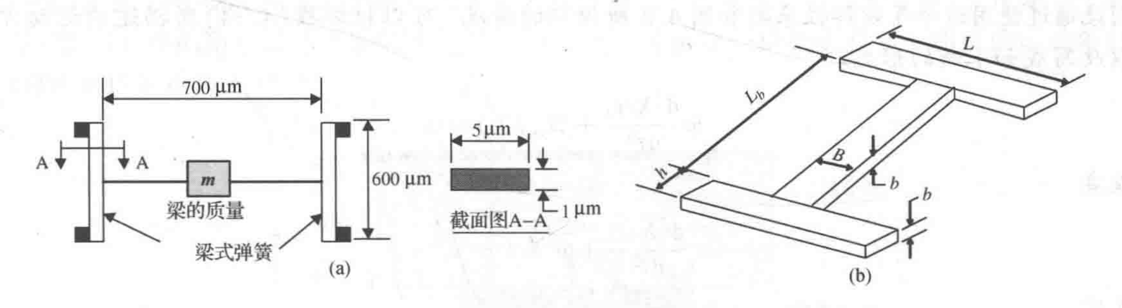


图4.20　力平衡型微加速度计的尺寸：(a)理想化的结构；(b)透视图

假设整个结构由硅材料构成，其杨氏模量为$E=190\,000$ MPa，并假定检测质量m集中在运动梁的质心位置处，如图4.19(b)所示。

解答：根据图4.20(a)中所给定的加速度计的结构尺寸，可以得出图4.20(b)中用于计算加速度计固有频率所需的相关尺寸：

$$b=1\times10^{-6}\text{ m}\quad B=100\times10^{-6}\text{ m}$$

$$L=600\times10^{-6}\text{ m}\quad L_b=700\times10^{-6}\text{ m}$$

由运动梁构成的检测质量可以通过$m=\rho V$来计算求得，其中ρ是硅材料的质量密度，由表7.3可以查出其数值为2.3 g/cm^3，而$V=BbL_b$则是梁的体积，最终计算得到的检测质量为$m=16.1\times10^{-11}$ kg。

首先计算梁式弹簧的面积惯性矩I：

$$I=\frac{bh^3}{12}=\frac{(1\times10^{-6})(5\times10^{-6})^3}{12}=10.42\times10^{-24}\text{ m}^4$$

情况1：梁末端简支，如图4.18(b)所示，可以计算得到等效弹性系数k为：

$$k=\frac{48EI}{L^3}=\frac{48(190\,000\times10^6)(10.42\times10^{-24})}{(600\times10^{-6})^3}=0.44\ \text{N/m}$$

依据图4.20所示的结构，该系统的固有频率类似于例题4.6及图4.8所描述的那种一个质量块在两个弹簧之间振动的情形。因此可以求得：

$$\omega_n=\sqrt{\frac{2k}{m}}=\sqrt{\frac{2\times0.44}{16.1\times10^{-11}}}=23\,380\ \text{rad/s}$$

情况2：梁末端固支，如图4.18(c)所示，等效弹性系数k的计算采用另外一种形式：

$$k=\frac{192EI}{L^3}=\frac{192(190\,000\times10^6)(10.42\times10^{-24})}{(600\times10^{-6})^3}=1.76\ \text{N/m}$$

与之对应的固有频率ω_n为：

$$\omega_n=\sqrt{\frac{2k}{m}}=\sqrt{\frac{2\times1.76}{16.1\times10^{-11}}}=147\,860\ \text{rad/s}$$

从上面的计算结果中可以看到，这种梁式加速度计的设计方案在上述两种情况下的固有频率都非常高，可以避免发生共振。

例题4.10　考虑例题4.9中的微加速度计，其从50 km/h的初始速度开始减速直到完全静止，计算其开始减速1 ms后微加速度计中的质量块偏离平衡位置的位移。

解答：在例题4.9所示的第二种情况中，我们已经获得了等效弹性系数为$k_{eq}=1.76$ N/m。因此通过使用这个等效弹性系数和图4.8所模拟的情况，可以把方程(4.14)所描述的运动方程改写成如下新的形式：

$$m\frac{d^2X(t)}{dt^2}+2k_{eq}X(t)=0$$

或者

$$\frac{d^2X(t)}{dt^2}+\omega^2X(t)=0$$

式中，

$$\omega=\sqrt{\frac{2k_{eq}}{m}}=\sqrt{\frac{2\times1.76}{16.1\times10^{-11}}}=147\,860\ \text{rad/s}$$

上述微分方程的两个初始条件为：

初始位移：$X(t)\big|_{t=0}=0$

初始速度：$\left.\dfrac{dX(t)}{dt}\right|_{t=0}=50\ \text{km/h}=13.8888\ \text{m/s}$

上述微分方程的通解与方程(4.15)所表示的解的形式类似，即：

$$X(t)=C_1\cos(\omega t)+C_2\sin(\omega t)$$

其中的两个任意常数C_1和C_2可以由上面给出的两个初始条件求得：$C_1=0$，$C_2=9.3932\times10^{-5}$，由此可以得到下面的关于梁质量块质心的瞬态位置表达式：

$$X(t)=9.3932\times10^{-5}\sin(147\,860t)$$

梁质量块在$t=1\ \text{ms}=10^{-3}$ s时偏离初始平衡位置的位移可以从上面的表达式求得：$X(10^{-3})=9.3932\times10^{-5}\sin(147\,860\times10^{-3}\text{rad})=9.3932\times10^{-5}\sin(8476°)=-2.597\times10^{-5}\ \text{m}\approx-26\ \mu\text{m}$，即质量块朝着与减速度相反的方向偏离初始平衡位置26 μm。

4.3.5　阻尼系数

方程(4.19)中的阻尼系数 c 对机械振动系统的物理特性具有很重要的影响。图 4.15 显示，检测质量的振幅对 h 因子非常敏感，而 h 因子则与周围介质的阻尼系数密切相关。

阻尼是一种形式的阻力，它是由振动质量表面与周围流体(可能是气体或者液体)之间的摩擦所引起的。在微加速度计的设计中，阻尼效应有可能会以两种截然不同的方式出现：

(a)压膜阻尼，主要指的是如图 4.13 所示的那些微加速度计，其周围的阻尼流体会受到振动质量块的压缩。

(b)剪切阻力，主要指的是如图 1.6、图 2.35 以及图 4.19 所描述的那种力平衡型的微加速度计。

无论是哪一种情况，其阻尼系数 c 都可以通过下面的简单关系式得到：

$$F_D(t) = cV(t) \tag{4.36}$$

式中，F_D是对运动质量块所受到的阻力，c 是阻尼系数，$V(t)$是运动质量块的速度。

在微加速度计的设计中，我们将推导出估算阻尼系数的公式。

压膜中的阻尼系数　下面的推导过程是基于以下两篇文献[Newell，1968；Starr，1990]所提供的信息。图 4.21 所示的系统代表了一个长度为 $2L$、宽度为 $2W$ 的振动条，它压缩一个狭窄缝隙 $H(t)$中的阻尼流体。如果我们用 $y(t)$来代表该振动条的瞬态位置，那么该运动条的速度则可以表示为 $\dot{y}(t)$。

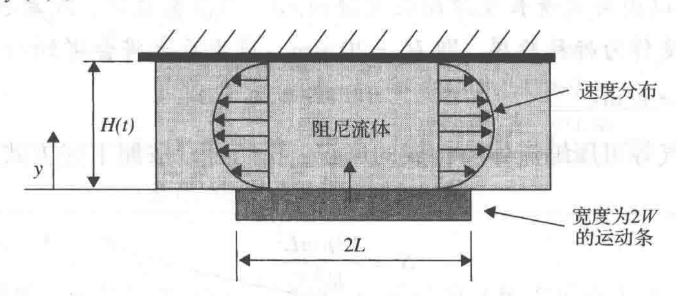


图 4.21　压膜阻尼效应

对于不可压缩的阻尼流体介质来说，我们可以得到以下关于阻力 F_D的表达式：

$$F_D = 16f\left(\frac{W}{L}\right)W^3L\left(\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t}\right)H_0^3 \tag{4.37}$$

式中，H_0是流体薄膜的标称厚度。

方程(4.37)中 $y(t)$的导数代表运动条的速度，因此通过联立方程(4.36)与方程(4.37)就能够求得压缩阻尼系数 c：

$$c = 16f\left(\frac{W}{L}\right)W^3LH_0^3 \tag{4.38}$$

表 4.2 中给出了方程(4.38)中的函数 $f(W/L)$的数值与 W/L 之间的关系。很显然，不可压缩压膜中的阻尼系数与流体的性质无关。

表 4.2 压膜阻尼效应的几何函数

W/L	f(W/L)	W/L	f(W/L)
0	1.00	0.6	0.60
0.1	0.92	0.7	0.55
0.2	0.85	0.8	0.50
0.3	0.78	0.9	0.45
0.4	0.72	1.0	0.41
0.5	0.60		

例题 4.11 估算如图 4.22 所示的一种使用悬臂梁式弹簧的微加速度计的阻尼系数 c。

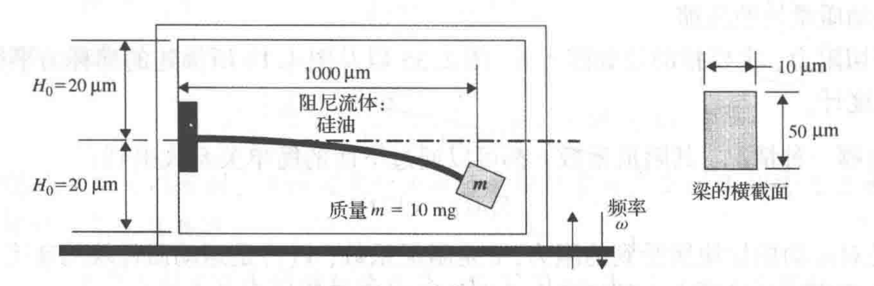


图 4.22 使用液态阻尼介质的微加速度计

解答:对于图 4.22 所示的情况,其阻尼系数可以通过方程(4.38)来求得,其中 $L \approx 500 \times 10^{-6}$ m, $W = 5 \times 10^{-6}$ m。根据表 4.2 所列数据对 $W/L = 0.01$ 进行插值可求得函数 $f(W/L) = 0.992$。

标称膜厚 H_0 可以由梁沿着长度方向最大挠曲的平均值来决定,或者也可以如图 4.22 所示简单地将缝隙宽度作为标称膜厚,即 $H_0 = 20$ μm。采用后者将会得到一个非常小的阻尼系数值 $c = 8 \times 10^{-33}$ N·s/m。

对于由诸如空气等可压缩流体所构成的压膜,我们可以按照下述方式引入一个压缩数 S [Starr, 1990]:

$$S = \frac{12\mu\omega L^2}{H_0^2 P_a} \tag{4.39}$$

式中, μ 为气体薄膜的动力黏度,单位是 N·s/m²; ω 为质量块的振动频率,单位是 rad/s; L 为特征长度,单位是 m; P_a 为周围环境气体的压力,单位是 Pa。

阻尼效应可以包括在等效弹性系数 k 的刚度增加量 Δk 中:

$$\frac{\Delta k}{k} = \alpha f_k(\varepsilon)\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) hS \tag{4.40}$$

式中,对于梁式弹簧这样的长窄条来说,常数 $\alpha = 0.8$; $h = c/(2m\omega_n)$,其中 ω_n 是加速度计的固有频率;而 ε 则是运动质量块的位移与膜厚之比。

函数 $f_k(\varepsilon)$ 可以根据下面的表达式来确定:

$$f_k(\varepsilon) = \frac{1 + 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon^4/8}{(1 - \varepsilon^2)^3} \tag{4.41}$$

图 4.23 定性地绘出了式(4.40)随着输入频率 ω 变化的曲线。

由于上述表达式是在无滑移流体流动假设的前提下,根据连续介质的流体力学理论推导

出来的，因此读者在使用这个公式的时候就需要特别小心。能否正确合理地使用连续介质的流体力学理论受到膜厚或图 4.21 中缝隙宽度 $H(t)$ 的限制。对于不同类型的气体薄膜，只有当满足 $H > H_{threshold}$ 时，该理论才能够正确应用，其中 $H_{threshold}$ 由气体分子的平均自由程决定，有关这方面的内容将在第 12 章中介绍。对于 25℃、1 个标准大气压下的空气来说，气体分子的平均自由程大约为 0.09 μm 或 90 nm。当缝隙宽度小于 100 倍的平均自由程时，气体就有可能在薄膜缝隙中发生滑移流动。因此，上述表达式只有在空气薄膜厚度 $H > 9$ μm 时才是正确有效的。

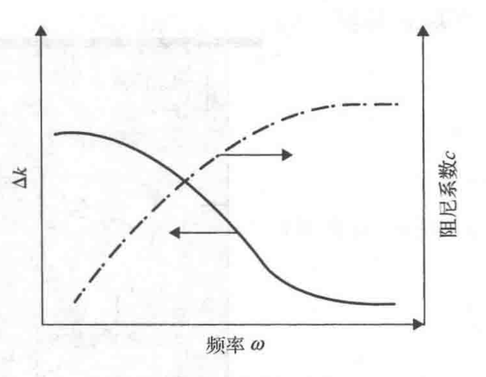


图 4.23　可压缩流体的压膜阻尼系数

我们注意到在方程(4.39)中出现了流体的动力黏度 μ。在评估振动系统的阻尼效应方面，流体的这一特性毫无疑问是一个重要的因素。表 4.3 列出了我们挑选出来的 7 种流体的动力黏度。至于其他多种流体的动力黏度，读者可以在 *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*(《供机械工程师使用的马克标准手册》)一书中找到[Avallone 和 Baumeister，1996]。

表 4.3　几种流体的动力黏度(10^{-6} N · s/m²)

可压缩流体	0℃	20℃	60℃	100℃	200℃
空气	17.08	18.75	20.00	22.00	25.45
氦气	18.60	19.41	21.18	22.81	26.72
氮气	16.60	17.48	19.22	20.85	24.64
不可压缩流体	0℃	20℃	40℃	60℃	80℃
乙醇	1772.52	1199.87	834.07	591.80	432.26
煤油	2959.00	1824.23	1283.18	971.96	780.44
淡水	1752.89	1001.65	651.65	463.10	351.00
硅油[a]	20℃：740				

[a]引自[Pfahler 等人，1990]。

剪切流中的微阻尼　正如图 2.35 以及图 4.19 所示的这种力平衡型加速度计，它们都是由一个细的振动梁–质量块构成的微加速度计，其中的质量块(通常称为检测质量)在周围的流体中运动，其阻尼效应不是通过压缩其接触的流体而产生的。相反，它是由梁质量的接触表面与周围流体之间的剪切流阻力而引起的。

我们来考虑图 4.24 所示的情形，其中的运动质量块 m 在周围的流体中以速度 V 运动。假设的无滑移流体流动条件将导致梁的两个表面的流体速度呈线性分布，如图中所示。

在梁质量块的上表面或者下表面的剪切应力 τ_S 可以表示为：

$$\tau_s(y) = \mu \frac{du(y)}{dy} \tag{4.42}$$

式中，μ 是阻尼流体的动力黏度；$u(y)$ 是流体中的速度分布，其中位于流体–固体界面处的流体速度为 V。

在目前这种情况下速度分布遵循线性关系，也就是 $u(y) = Vy/H$，其中 H 是梁的顶部或底部与封闭外壳之间的缝隙宽度。

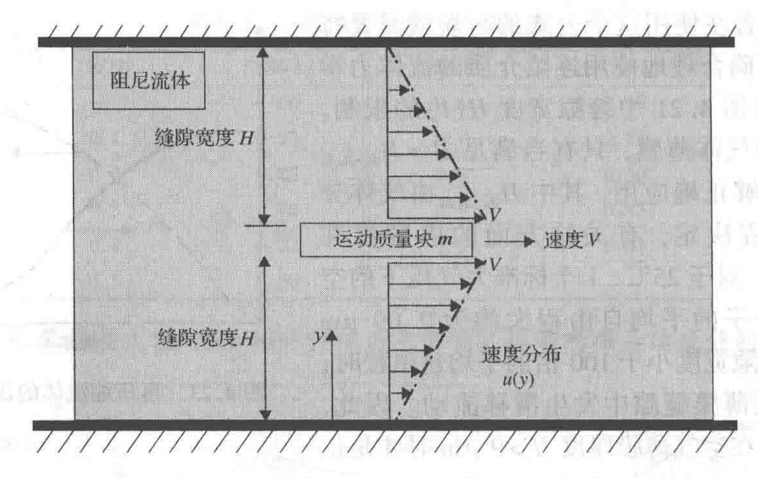


图 4.24　无滑移流体流动中的运动质量块

利用方程(4.42)以及上面给出的速度分布函数，可以求出接触表面上的剪切应力 τ_0 为：

$$\tau_0 = \frac{\mu V}{H}$$

由此可以计算出作用在梁质量块顶部和底部表面上的等效剪切力 F_D 为：

$$F_D = \tau_0(2Lb) = \frac{2\mu Lb}{H}V$$

式中，L 和 b 分别是梁质量块的长度和宽度。

阻尼系数 c 因而可以利用方程(4.36)计算得到：

$$c = \frac{F_D}{V} = \frac{2\mu Lb}{H} \quad \text{N·s/m} \tag{4.43}$$

例题4.12　考虑例题4.9所描述的力平衡型微加速度计，该加速度计的核心元件位于一个密封腔内，如图4.25所示，当分别采用空气和硅油作为阻尼流体时，估算出该微加速度计的阻尼系数。假定该微加速度计工作在20℃。

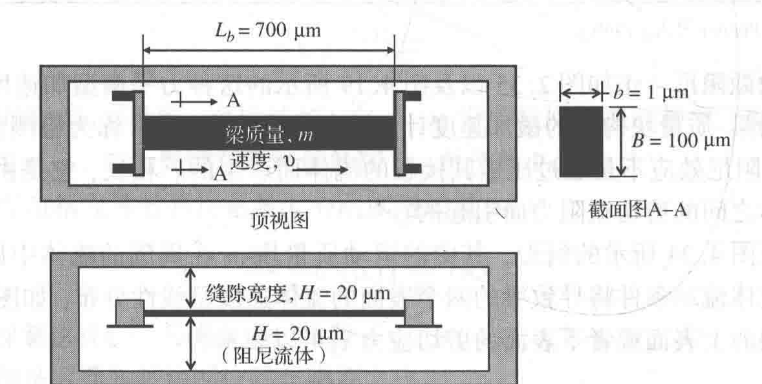


图 4.25　一个力平衡型微加速度计的阻尼效应

解答：根据图4.25所示结构，可以得到下述物理尺寸：梁质量块的宽度 $B = 100 \times 10^{-6}$ m，梁的长度 $L_b = 700 \times 10^{-6}$ m，缝隙宽度 $H = 20 \times 10^{-6}$ m。

从表4.3中可以查得，空气在20℃时的黏度是$\mu_{air}=18.75\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s/m^2}$。因此可以根据方程(4.43)求得其阻尼系数$c$为：

$$c=\frac{2\mu_{air}L_bB}{H}=\frac{2(18.75\times10^{-6})(700\times10^{-6})(100\times10^{-6})}{20\times10^{-6}}$$
$$=2.625\times10^{-12}\ \mathrm{N\cdot s/m}$$

对于采用硅油作为阻尼流体的情况，同样可以从表4.3中查得20℃时硅油的黏度为$\mu_{si}=740\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s/m^2}$，由此导致其阻尼系数为：

$$c=\frac{2\mu_{si}L_bB}{H}=\frac{2(740\times10^{-6})(700\times10^{-6})(100\times10^{-6})}{20\times10^{-6}}$$
$$=1.036\times10^{-10}\ \mathrm{N\cdot s/m}$$

从上面的最后两个例题中我们注意到，微加速度计中的阻尼效应实际上是非常小的。这种情况使得方程(4.32a和b)中的h值也非常小。因此，就像我们在图4.15中所观察到的那样，有可能从具有较低h值的微加速度计获得较大的信号输出。较低的阻尼系数确实增强了微加速度计的信号输出。

例题4.13　考虑例题4.12中所描述的微加速度计，其从50 km/h的初始速度开始减速直到完全静止，计算其开始减速1 ms后微加速度计中的梁质量块偏离平衡位置的位移。该加速度计浸没在起阻尼介质作用的硅油中。

解答：根据图4.25所示的微加速度计结构，可以求得采用硅油作为阻尼流体时的阻尼系数为$c=1.036\times10^{-10}\ \mathrm{N\cdot s/m}$。

振动梁质量块的运动方程与例题4.10中所讨论的情形类似，只是需要增加一个考虑阻尼效应的项：

$$m\frac{\mathrm{d}^2X(t)}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}+2k_{eq}X(t)=0 \tag{a}$$

式中，m是梁质量块的质量，k_{eq}是与梁质量块相连接的梁式弹簧的弹性系数。

方程(a)可以进一步改写为下述形式：

$$\frac{\mathrm{d}^2X(t)}{\mathrm{d}t^2}+\frac{c}{m}\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}+\omega^2X(t)=0 \tag{b}$$

在例题4.10中我们已经通过分析计算得到了m和ω的数值，对于末端固支的梁式弹簧，$\omega'=147\,860\ \mathrm{rad/s}$，$m=16.1\times10^{-11}\ \mathrm{kg}$。因此对于本例题中的情形，方程(b)可以表示为下面的形式：

$$\frac{\mathrm{d}^2X(t)}{\mathrm{d}t^2}+0.6435\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}+(1.4786\times10^5)^2X(t)=0 \tag{c}$$

其初始条件为：

$$X(t)|_{t=0}=0 \tag{d}$$

和

$$\left.\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0}=13.8888\ \mathrm{m/s} \tag{e}$$

该初始条件在例题4.9中已经给出过。上述方程(c)的解也已经在方程(4.20c)中给出，其中，

$$\lambda=\frac{c}{2m}=\frac{1.036\times10^{-10}}{2\times16.1\times10^{-11}}=0.3217$$

很容易看到：$\lambda^2-\omega^2\ll 0$，这就使得方程(c)的解具有下面的形式：

$$X(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t}\left(c_1\cos\sqrt{\omega^2-\lambda^2}t+c_2\sin\sqrt{\omega^2-\lambda^2}t\right) \tag{f}$$

式中，c_1和c_2是由方程(d)和方程(e)所表示的初始条件决定的两个任意常数，可以求得$c_1=0$，$c_2=9.4\times10^{-5}$。有了λ、ω以及c_1、c_2的具体数值之后，方程(c)的完整解就可以表示为：

$$X(t)=9.4\times10^{-5}\mathrm{e}^{-0.3217t}\sin(1.4786\times10^5t) \tag{g}$$

在方程(g)中，$X(t)$代表密封腔中的梁质量块由于受到特定的减速作用后在任意时刻t的运动位置。因此梁质量块在$t=1$ ms时的运动位置可以通过方程(g)估算为：

$$X(10^{-3})=9.4\times10^{-5}\mathrm{e}^{-0.3217(10^{-3})}\sin(146.86\ \mathrm{rad})$$

亦即：

$$X(10^{-3})=9.4\times10^{-5}\mathrm{e}^{-0.3217(10^{-3})}\sin(8476^\circ)=-2.58\times10^{-5}\ \mathrm{m}\ 或-25.8\ \mu\mathrm{m}$$

关于梁质量块在采用硅油作为阻尼介质时的运动情况，本例题给出的计算结果比没有阻尼条件下例题4.10给出的计算结果要小5%左右。

例题4.14　如图4.26所示，两辆质量分别为m_1和m_2的汽车，分别以速度V_1和V_2相向而行。每辆汽车上都安装了一个如例题4.8所示的悬臂梁结构的惯性传感器(或微加速度计)。估算出质量为m_1的汽车上传感器检测质量的挠曲形变以及两车碰撞后嵌入在梁上靠近支撑点处顶部和底部表面的两个压电电阻的应变。

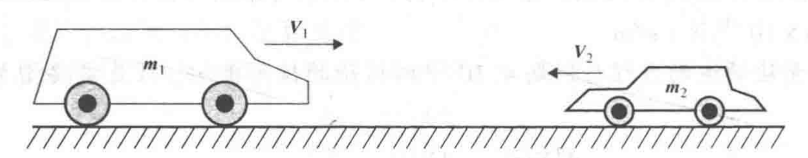


图4.26　两个即将迎头相撞的汽车

关于例题4.8中的微加速度计，我们有如下信息：等效弹性系数$k=59.39$ N/m，固有频率$\omega_n=2437$ rad/s。梁的属性如下：杨氏模量$E=1.9\times10^{11}$ N/m²，截面的惯性矩$I=0.1042\times10^{-18}$ m⁴，梁的标称长度$L=1000$ μm，从外表面到质心的距离$C=25\times10^{-6}$ m。

另外在计算中我们还已知下述条件：$m_1=12\ 000$ kg，$m_2=8000$ kg，$V_1=V_2=50$ km/h。

解答：假设两车碰撞后缠在一起，并以一个共同的速度V运动，如图4.27所示。两车纠缠在一起最终的共同速度V可以由动量守恒定律计算出：

$$V=\frac{m_1V_1-m_2V_2}{m_1+m_2}=\frac{12\ 000\times50-8000\times50}{12\ 000+8000}=10\ \mathrm{km/h}$$

两车的减速度可以根据下面的表达式求出：

$$质量为\ m_1\ 的汽车：\ddot{X}=(V-V_1/\Delta t)$$

$$质量为\ m_2\ 的汽车：\ddot{X}=(V-V_2/\Delta t)$$

式中，Δt是减速所需的时间。

假定m_1汽车碰撞后速度从50 km/h下降到10 km/h需要0.5 s的时间，因此在上述表达式中，汽车m_1的减速时间为$\Delta t=0.5$ s。由此可以计算出汽车m_1的减速度为：

$$\ddot{X}=a_{\mathrm{base}}=\frac{(10-50)\times10^3/3600}{0.5}=-22.22\ \mathrm{m/s^2}$$

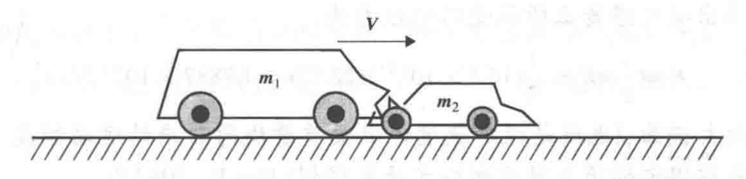


图4.27 碰撞之后的两辆汽车

可以断言，在发生碰撞的情形下任意一辆汽车的振动频率 ω 都要远小于微加速度计的固有频率 ω_n，即 $\omega \ll \omega_n$。因此利用式(4.33)来计算检测质量的最大位移 Z 是合适的：

$$Z = -\frac{a_{\text{base}}}{\omega_n^2} = \frac{22.22}{(2437)^2} \doteq 3.74 \times 10^{-6}\ \text{m 或 } 3.74\ \mu\text{m}$$

因此我们可以预期检测质量在碰撞过程中移动了3.74 μm，这意味着悬臂梁自由端的最大挠曲也是3.74 μm。

自由端达到这种挠曲所对应的力为：

$$F = \frac{3EIZ}{L^3} = \frac{3(1.9\times10^{11})(0.1042\times10^{-18})(3.74\times10^{-6})}{(1000\times10^{-6})^3} = 2.2213\times10^{-4}\ \text{N}$$

等效的最大弯矩 $M_{\max} = FL$，即：

$$M_{\max} = 2.2213\times10^{-4}\times10^{-3} = 2.2213\times10^{-7}\ \text{N·m}$$

由此可以计算出靠近支撑点处的最大弯曲应力 $\sigma_{\max}$ 为：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}C}{I} = \frac{(2.2213\times10^{-7})(25\times10^{-6})}{0.1042\times10^{-18}} = 532.95\times10^5\ \text{Pa} = 53.30\ \text{MPa}$$

对应这些位置处压电电阻器的最大应变度为：

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{53.30\times10^5}{190\times10^9} = 02.81\times10^{-4} = 0.0281\%$$

例题4.15 对于例题4.14中计算的汽车 m_1 的减速度 $\ddot{X} = -22.22\ \text{m/s}^2$，试确定例题4.9中所描述的力平衡型微加速度计是否适用于测量其中梁质量块的运动？

解答：图4.19和图4.20给出了该微加速度计的尺寸，它安装在汽车的底盘上。梁质量块的两端与两个梁式弹簧相连接，汽车22.22 m/s² 的减速度通过梁质量块产生了一个沿着纵向的惯性力 $F = m\ddot{X}$，其中 m 是梁检测质量块的质量。每个连接的弹簧分别承担了梁中点所承受惯性力的一半，由此可以得到如图4.28所示的受力图。

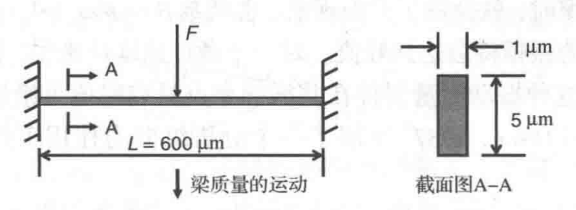


图4.28 梁式弹簧所承受的惯性力

在例题4.9中已经计算出了以下数值：

梁式弹簧的面积惯性矩为：$I = 10.42\times10^{-24}\ \text{m}^4$

梁检测质量块的质量为：$m = 16.1\times10^{-11}\ \text{kg}$

由此可以计算出梁式弹簧上所承受的惯性力为：

$$F=\frac{1}{2}m\ddot{X}=\frac{1}{2}(16.1\times10^{-11})(22.22)=1.7887\times10^{-9}\ \mathrm{N}$$

梁式弹簧的最大挠曲，也就是微加速度计中梁质量块所对应的运动幅度，可以通过手册中给出的有关两末端固定的简支梁弯曲公式计算得到[Roark, 1965]：

$$\delta_m=\frac{1}{192}\frac{FL^3}{EI}=\frac{(1.7882\times10^{-9})(600\times10^{-6})^3}{192(1.9\times10^{11})(10.42\times10^{-24})}$$

$$=1.012\times10^{-9}\ \mathrm{m}\ 或\ 1.012\ \mathrm{nm}$$

我们注意到梁质量块所对应的运动幅度大约为 1 nm，这个运动幅度确实是太小了，用传统的手段根本无法测量出来。因此例题 4.9 中所描述的微加速度计不适用于测量这个梁质量块的运动。

4.3.6 谐振式微传感器

从方程(4.16)中我们已经了解到一个简单的质量块-弹簧系统的固有频率与弹簧的弹性系数以及振动质量有关。事实上，一个结构或者器件的几何形状要比简单的质量块-弹簧系统复杂得多。但是具有复杂几何形状的器件与简单的质量块-弹簧系统一样会很容易受到共振的影响。正如我们在 4.3.2 节中所描述的那样，一个具有复杂几何结构器件的固有频率是与该器件的刚度矩阵[**K**]以及质量矩阵[**M**]相关的。器件在不同振动模式下的固有频率因此可以表达为类似于简单的质量块-弹簧系统的形式：

$$\omega_n=\sqrt{\frac{[\mathbf{K}]}{[\mathbf{M}]}} \tag{4.44}$$

其中振动模式数 $n=1, 2, 3, \cdots$。

方程(4.44)中的刚度矩阵和质量矩阵都可以通过有限元分析方法获得，这部分内容将在第 10 章中介绍。刚度矩阵[**K**]与器件的几何形状及材料特性有关，因此我们不难理解一个结构部件中任何应力的变化以及相关应变特性的变化都会导致该部件几何形状的改变，这也会导致刚度矩阵[**K**]的变化。因此一个器件或者部件的固有频率会随着结构中应力状态的改变而发生变化。当一个器件处于不同的应力状态时，我们可以预料到它的固有频率也会发生相应的变化。

正如我们在图 4.12 和图 4.15 中所观察到的，当与加速度计相连接的外壳振动频率等于器件任意模式下的固有频率时，就会发生共振现象，也就是 $\beta=\omega/\omega_n\to1.0$，其中 $n=1, 2, 3, \cdots$。在这个频率下检测质量的振幅将会达到峰值。对一个微加速度计来说，器件在这一频率提供了最灵敏的输出。因此，这种振动测量器件在共振频率点具有峰值灵敏度的优势已经被用于微传感器的设计中。Howe[Howe, 1987]发展了一个分析纵向力作用下振动梁在模式 1 下固有频率的理论：

$$\omega_{n,1}^2=\frac{\int_0^L(EI/2)\left[\mathrm{d}^2Y_1(x)/\mathrm{d}x^2\right]^2\mathrm{d}x+\int_0^L F/2\left[\mathrm{d}Y_1(x)/\mathrm{d}x\right]^2\mathrm{d}x}{\int_0^L(1/2)\rho bhY_1^2(x)\,\mathrm{d}x} \tag{4.45}$$

式中，F 为施加到振动梁上的力，它可以转换成振动梁上的垂直应力；ρ 为梁材料的质量密度；E 为杨氏模量；I 为梁横截面的面积惯性矩；b 和 h 分别是矩形梁横截面的宽度和厚度。

式(4.45)中的函数 $Y_1(x)$ 是振动梁的振幅，如图4.29所示。函数 $Y_1(x)$ 可以通过求解形式为 $y(x,t)=Y_1(x)\exp(\mathrm{i}\omega t)$ 的方程得到，其中 $\mathrm{i}=\sqrt{-1}$，ω 为振动梁的频率。

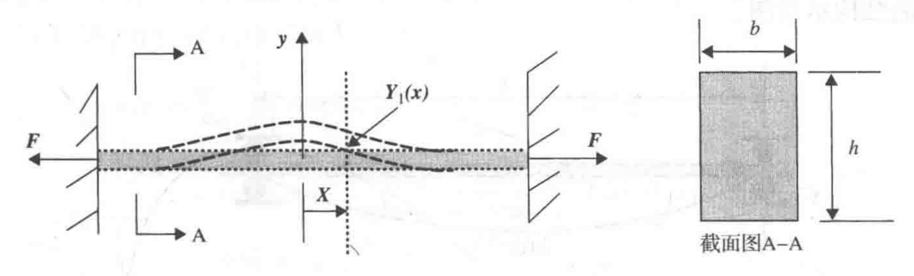


图4.29　承受张力的振动梁

振动梁的解 $y(x,t)$ 可以通过求解下述偏微分方程得到：

$$\alpha^2\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}+\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}=0 \tag{4.46}$$

式中，$\alpha=\sqrt{EI/\gamma}$，其中 γ 是梁单位长度的质量。

方程(4.46)的求解显然需要给出特定的初始条件和端点条件。对于微桥设计，可以获得几个端点固定条件下的解[Bouwstra 和 Geijselaers, 1991]。下面给出一个具有以下初始条件和端点条件的特殊情形的解[Trim, 1990]。

这种情形是针对以模式1振动的简支梁而言的，如图4.30所示。求解方程(4.46)的初始条件和端点条件按照下述方式来选取，即采用梁在处于稳定平衡状态时的初始形变量和初始速度来作为初始条件：

$$y(x,0)=f(x)=x\sin\frac{\pi x}{L}\quad,\quad 0\leqslant x\leqslant L$$

$$\left.\frac{\partial y(x,t)}{\partial t}\right|_{t=0}=0,\quad 0\leqslant x\leqslant L$$

当 $t>0$ 时简支梁的端点条件或边界条件可表示为：

$$y(0,t)=0,\qquad y(L,t)=0$$

$$\left.\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right|_{x=0}=0,\qquad \left.\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right|_{x=L}=0$$

依据上面的初始条件和边界条件，方程(4.46)的解 $y(x,t)$ 将具有如下形式：

$$y(x,t)=\frac{L}{2}\sin\frac{\pi x}{L}\cos\frac{\pi^2\alpha t}{L^2}-\frac{16L}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n}{(4n^2-1)^2}\sin\frac{2n\pi x}{L}\cos\frac{4n^2\pi^2\alpha t}{L^2} \tag{4.47}$$

式(4.47)中的数字 $n=1, 2, 3, \cdots$，它代表梁振动的不同模式。在实际的设计过程中通常取模式1(即 $n=1$)的解。我们可以推导出振动的最大振幅，也就是式(4.45)中的函数 $Y_1(x)$。

式(4.45)已经表明振动梁的固有频率会随着施加的轴向力(或垂直应力)的改变而发生变化。这一原理已经被用来构造高灵敏度的压力传感器[Petersen 等人, 1991]，在这个微器件中，一个p型掺杂的单晶硅梁通过熔融键合的方式与一个压力传感器中振动膜正面腔的中部相连接，该单晶硅梁的尺寸为40 μm宽×6 μm厚×600 μm长。首先给硅梁下面通过扩散形成的偏转电极上施加一个交流电压信号以激励硅梁共振，这一般需要几毫伏的电压。由交

流电源产生的静电力以合适的频率间歇性地拉动硅梁向下运动，从而激励硅梁按照其固有频率发生振动。硅梁的共振可由扩散在梁末端的压电电阻来检测。图4.31给出了这种类型压力传感器的结构示意图。

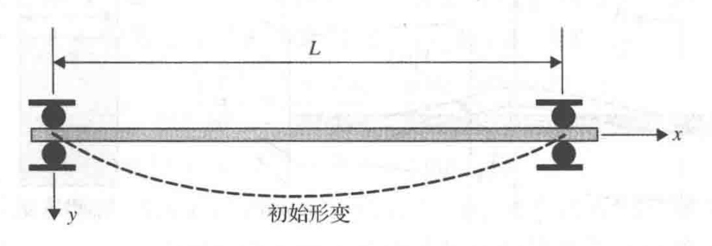


图4.30　自由振动的梁

施加在振动膜背面的压力会在振动梁上诱生出张应力，从而改变振动梁的固有频率。因此有必要调整外加的激励电压以便使硅梁能够在新的状态下发生共振。我们还可以对所施加的压力进行校准，以便适应振动梁共振频率的漂移。已有结果表明这种方法比使用其他方式进行信号转换(例如使用压电电阻或电容)的微压力传感器具有更高的灵敏度，已经获得的整体测量精度可以达到0.01%。这种压力传感器所对应的灵敏度已经在图2.14中给出。

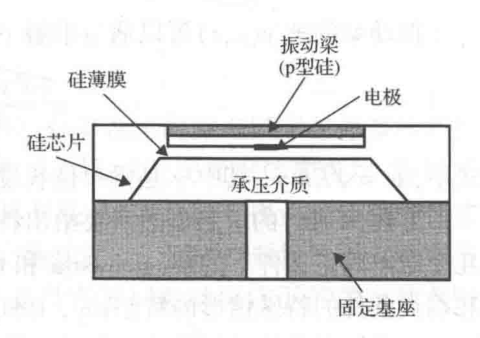


图4.31　谐振梁式压力传感器

例题4.16　计算末端固定的硅振动梁当承受187 MPa的纵向应力时其固有频率的改变，该硅振动梁的几何形状和尺寸如图4.32所示，该振动梁的宽度为$b=40\times10^{-6}$ m，深度(厚度)为$h=6\times10^{-6}$ m，长度为$L=600\times10^{-6}$ m。根据表7.3还可以获得有关该硅振动梁的其他特性参数为：杨氏模量$E=190\ 000$ MPa，质量密度$\rho=2300$ kg/m^3。

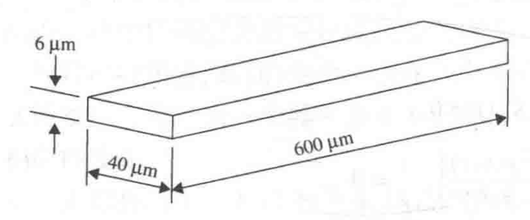


图4.32　硅振动梁的几何形状和尺寸

解答：求解该题所需的参数包括：

单位长度硅梁的质量为$\gamma=5.52\times10^{-7}$ kg/m

单位长度硅梁的重量为$w=5.4096\times10^{-6}$ N/m

面积惯性矩为$I=7.2\times10^{-22}$ m^4

可以利用偏微分方程(4.46)来求解满足下述边界条件和初始条件的振幅：

边界条件为：

$$\text{在 } x=0 \text{ 端，}\ \left.\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}=0 \quad y(x,t)|_{x=0}=0$$

$$\text{在 } x=L \text{ 端，}\ \left.\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}\right|_{x=L}=0 \quad y(x,t)|_{x=L}=0$$

梁的初始速度为：

$$\left.\frac{\partial y(x,t)}{\partial t}\right|_{t=0}=0$$

梁由于自身重量引起的初始下垂(可由手册获得)为：

$$y(x,t)|_{t=0} = f(x) = \frac{w}{24EI}(x-L)^2 x^2$$

上述偏微分方程的解可以利用分离变量的方法来求得。在满足上述边界条件和初始条件的前提下，方程(4.46)的解 $y(x,t)$ 可以表示为：

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} K_n \Big[\cosh(\lambda_n x) - \cos(\lambda_n x) - \frac{\cosh(\lambda_n L) - \cos(\lambda_n L)}{\sinh(\lambda_n L) - \sin(\lambda_n L)}[\sinh(\lambda_n x) - \sin(\lambda_n x)]\Big] \times \cos[\alpha(\lambda_n)^2 t]$$

上述求和公式中的核心系数 K_n 可以通过下面的积分求得：

$$K_n = \frac{\int_0^L f(x)X(x)\,\mathrm{d}x}{\int_0^L [X(x)]^2\,\mathrm{d}x}$$

上式中的函数 $X(x)$ 是通解 $y(x,t)$ 的一个组成部分，即：

$$X(x) = [\cosh(\lambda_n x) - \cos(\lambda_n x)] - \frac{\cosh(\lambda_n L) - \cos(\lambda_n L)}{\sinh(\lambda_n L) - \sin(\lambda_n L)}[\sinh(\lambda_n x) - \sin(\lambda_n x)]$$

而函数 $f(x)$ 则是作为两个初始条件之一给出的。

在这个无限级数形式的解中，n 代表振动的模式数。对于本例题来说，我们只对模式 1 的振动(也就是 $n=1$)感兴趣。其对应的特征值 λ_1 可以估值为 $4.73/L$。硅梁在模式 1 的固有振动频率为：

$$\omega_1 = \lambda_1^2 \sqrt{\frac{EI}{\gamma}} = 9.783 \times 10^5 \text{ rad/s}$$

或者：

$$\omega_1 = \frac{9.783 \times 10^5}{2\pi} = 1.557 \times 10^5 \text{ Hz}$$

方程(4.45)中的函数 $Y_1(x)$ 是用来确定由于外加应力而引起的固有频率的偏移，它可以根据上面给出的 $y(x,t)$ 在 $n=1$ 时的解得到：

$$Y_1(x) = K_1 X_1(x)$$

式中，K_1 和 $X_1(x)$ 分别是上述相关表达式在 $n=1$ 时的系数 K_n 和函数 $X(x)$。

外加到硅梁上的纵向力为 $F=A\sigma$，其中 A 是硅梁的横截面积(240×10^{-12} m^2)，σ 是外加的应力，其数值为 187 MPa。因此根据式(4.45)就可以计算出硅梁在该应力作用下固有频率的偏移为：

$$\omega_{1,s} = 1.932 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

或者

$$3.075 \times 10^5 \text{ Hz}$$

4.4　热力学

许多微系统或者是在高温工艺下制作出来的，例如通过熔融键合或氧化工艺，或者是要求在高温下能够正常工作，例如应用于汽车中的发动机汽缸压力传感器就属于这种情况。某

些传感元件，例如压电电阻，是对工作温度高度敏感的。因此，热效应是微系统设计和封装中需要考虑的一个重要因素。

一般说来，高温环境对于暴露在其中的微机械器件会带来以下3方面严重的影响。

4.4.1 材料机械强度的热效应

随着温度的升高，大多数工程材料的刚度(例如杨氏模量)、屈服强度以及极限强度都会降低，如图4.33所示，这种降低对于塑料和聚合物来说更加剧烈。幸运的是，用于各种微传感器和致动器中多数核心元件的材料，包括硅、石英以及派热克斯(Pyrex，一种耐热玻璃)玻璃，都是对温度相对不敏感的，因此这些器件部件在温度升高的环境中材料的特性也不会发生严重变化。从图4.33中也观察到大多数材料的热物理特性随着温度的增加而增大，而且这些变化在封装材料中表现得更为明显，例如在大多数微系统中使用的粘接剂、密封剂和芯片保护材料。表4.4列出了与温度相关的硅材料的比热和热膨胀系数。

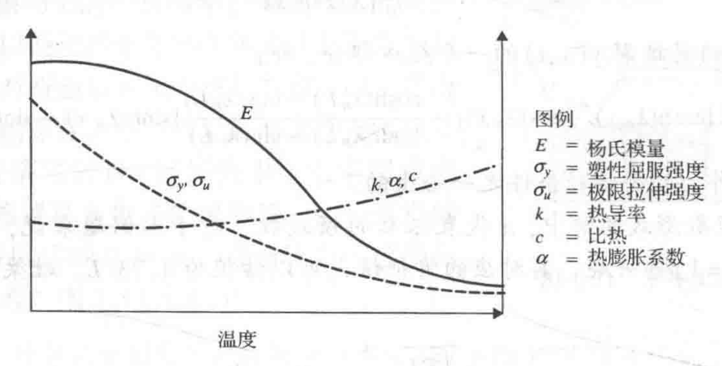


图4.33 材料特性随着温度的变化

表4.4 硅材料与温度相关的热物理特性

温度，K	比热，J/g·K	热膨胀系数 10^{-6}/K
200	0.557	1.406
220	0.597	1.715
240	0.632	1.986
260	0.665	2.223
280	0.691	2.432
300	0.713	2.616
400	0.785	3.253
500	0.832	3.614
600	0.849	3.842

资料来源："Properties of Silicon," EMIS Group, INSPEC, NY, 1988。

4.4.2 蠕动变形

当材料承受的温度超过其绝对温度熔点(即热力学温度的熔点)的一半数值时，该材料就会出现蠕动变形(简称蠕变)。蠕变是材料在没有承受额外机械载荷时所发生的一种变形。如图4.34所示，在微器件的某些组成部分，例如粘接剂和焊点连接处，当经过一段时间之后就会发生蠕变。蠕变通常会经历3个阶段：初期蠕变、稳态期蠕变和三期蠕变。这些材料一

且长时间持续承受较高的工作温度，就会导致危害严重的三期蠕变，从而造成器件的彻底损坏。

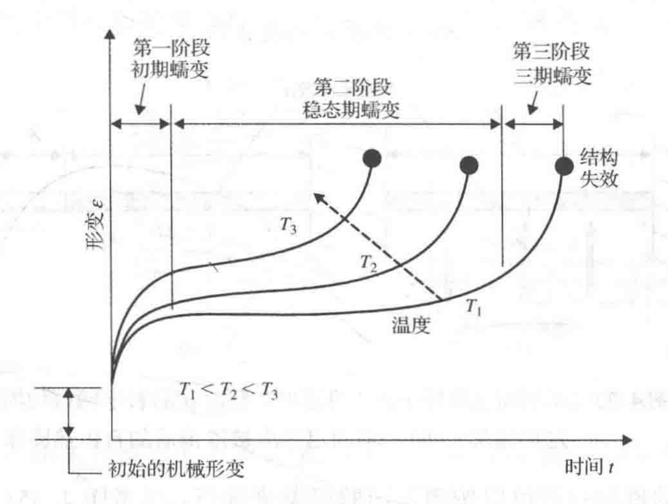


图 4.34　材料在高温中的蠕变

对于材料的蠕变行为，还有一个重要的事实就是升高工作温度带来的影响，即蠕变曲线会随着温度的升高而变得越来越陡。我们很容易从图 4.34 中看到，随着温度的不断升高，蠕变曲线三个阶段的区别变得越来越模糊了。与较低工作温度的情形相比，微结构在这些高温下发生蠕变失效所需的时间变得更短了。

尽管蠕变对微系统中的塑料、聚合物以及键合材料可能是一个重要的设计考虑，但是对于大多数由硅或者硅的化合物制成的传感元件和致动元件来说，由于这些材料通常具有非常高的熔点，因此蠕变对这些元件的设计不是什么大问题。已经有很多出版物论述与微电子焊点可靠性相关的焊接合金材料的蠕变特性[Hsu 和 Zheng，1993；Hsu 等人，1993]。

4.4.3　热应力

当微器件工作在温度升高的环境中时，或者由于机械限制因素，或者由于配套零部件之间热膨胀系数(CTE)的失配，就会在微器件中诱生出热应力。即使在机械限制因素很小甚至没有的微器件中，也可能由于器件结构中温度分布的不均匀而产生热应力。由于大多数微系统都是由不同材料制成的元件所组成的，例如多层薄膜结构，因此在设计阶段就必须准确评估热膨胀系数(CTE)失配所产生的热应力，否则过大的热应力就会引起微器件失效。因此，热应力分析是微系统设计的一个重要组成部分。

对许多工程师来说，一个众所周知的物理现象就是各种材料的热胀冷缩特性。一种材料由于热环境的改变而发生膨胀或者收缩的幅度主要由以下两个因素决定：(1)温度的变化量 $\Delta T = T_2 - T_1$；(2)材料的热膨胀系数(CTE)α。热膨胀系数 α 定义为每度温度变化所引起的材料单位长度的热膨胀量，工业界常用的热膨胀系数的单位可以是 in/in/℉，也可以是 m/m/℃，或者 ppm/K(表示百万分之一每开尔文)。

一个如图 4.35(b)所示的杆子，其总的膨胀(当温度变化为 $+\Delta T$ 时)或收缩(当温度变化为 $-\Delta T$ 时)量可以通过公式 $\delta = L\alpha\Delta T$ 来计算，其中 L 是杆子在参考温度(例如室温下)时的原始长度，由此所引起的热应变即为 $\varepsilon_T = \delta/L = \alpha\Delta T$。

现在来分析图4.35(a)所示的情况。杆子的两端固定，我们可以预料，当杆子的温度升高值为$\Delta T = T_2 - T_1$时，杆子内部会产生一个压应力，该应力的大小为：



$$\sigma_T = E\varepsilon_T = -\alpha E\,\Delta T \tag{4.48}$$

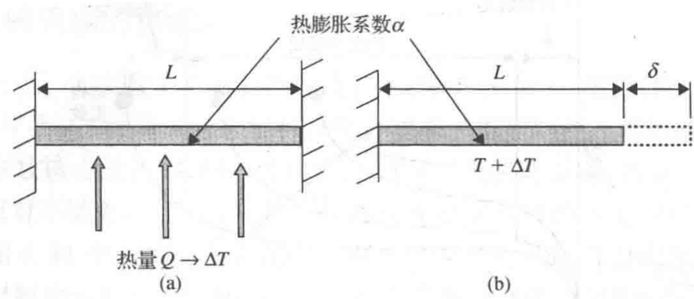


图4.35　末端固定的杆子处于升温时的情况：(a)杆子两端均固定的情形；(b)一端固定约束被取消后的自由热膨胀

上面这个公式的推导过程可以按照下面的思路来进行：参考图4.35(b)，首先计算杆子的某一端被释放为自由情况下的热膨胀量，此时杆子的自由热膨胀量为$\delta = L(\alpha\Delta T)$。但是实际上杆子的两端都是固定的，也就是杆子那一端并没有被释放，如图4.35(a)所示。我们可以考虑将这种情况等同于存在一个等效的机械力将自由膨胀的杆子推回一个δ的量。所需的这个推力将产生一个等效的压力，该压力进而导致了一个压应变$\varepsilon_T = -\delta/L = -\alpha\Delta T$，因此对应的压应力即为$\sigma_T = E\varepsilon_T = -\alpha E\Delta T$，如式(4.48)所示。

下面给出的实例将介绍如何求解由于热膨胀系数的失配所引起的热应力和形变。读者从中可以体会到这种情形在包含双层条板的微致动器设计中的应用。

图4.36给出了一个由两个带状板键合在一起形成的双层梁的示意图。这种双层带状板通常用于热驱动的微型镊子等微致动器中。由于两个带状板具有完全不同的热膨胀系数，因此这种情况能够使得双层带状板随着温度的上升或下降而发生向上弯曲或向下弯曲。这种致动产生的弯曲度同样也可以导致电路的关断或导通。

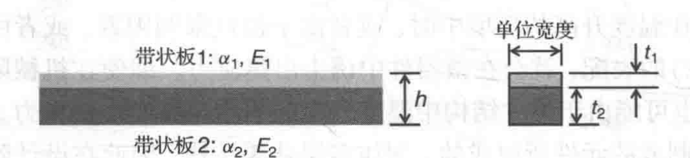


图4.36　承受温度变化的双层带状板

假设图4.36所示的平直双层带状板的初始温度为T_0，当双层带状板温度上升$\Delta T = T - T_0$时，其弯曲度的改变所产生的曲率半径如图4.37所示。这种由于温度ΔT偏离初始温度T_0所引起的曲率半径的改变可以通过下面的方程[Timoshenko, 1925]来计算：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6(1+m)^2(\alpha_1 - \alpha_2)\,\Delta T}{h\left\{3(1+m)^2 + (1+mn)\left[m^2 + 1/(mn)\right]\right\}} \tag{4.49}$$

式中，$m = t_1/t_2$，t_1和t_2分别是两个带状板的厚度；$n = E_1/E_2$，E_1和E_2分别是两个带状板的杨氏模量。

方程(4.49)是按照两个单位宽度的带状板推导出来的，二者各自的面积惯性矩分别为：

$$I_1 = \frac{1}{12}t_1^3, \quad I_2 = \frac{1}{12}t_2^3$$

其中的一个特例是两个带状板的厚度相同，即 $m=1$，如图4.38所示。

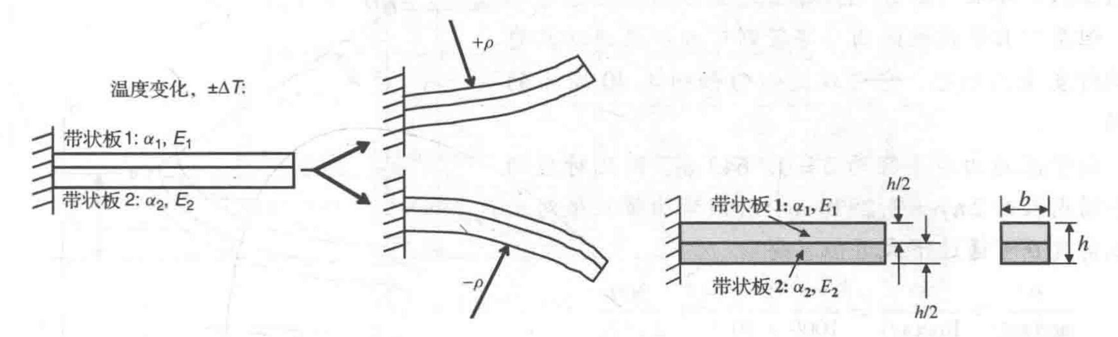


图4.37　双层带状板弯曲度的改变　　图4.38　承受温度变化的双层材料带状板

方程(4.49)可以用来计算界面力及其引起的带状板的弯曲度[Boley和Weiner，1960]：

$$F = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\ \Delta T}{8} \frac{hb}{1/E_1 + 1/E_2} \tag{4.50}$$

带状板弯曲变形的曲率半径由下式给出：

$$\rho = \frac{2h}{3(\alpha_1 - \alpha_2)\ \Delta T} \tag{4.51}$$

例题4.17　一个由双层带状材料，即经过氧化的硅梁，构成的微致动器如图4.39(a)所示，在氧化层的上表面淀积了一层电阻加热膜。试估算当温度上升 $\Delta T = 10℃$ 时，Si和 SiO_2 层之间的界面力以及双层带状板自由端的弯曲情况。可以采用的材料性能参数如下：

杨氏模量：$E_{SiO_2} = E_1 = 385\ 000$ MPa，$E_{Si} = E_2 = 190\ 000$ MPa

热膨胀系数(CTE)：$\alpha_{SiO_2} = \alpha_1 = 0.5 \times 10^{-6}/℃$，$\alpha_{Si} = \alpha_2 = 2.33 \times 10^{-6}/℃$

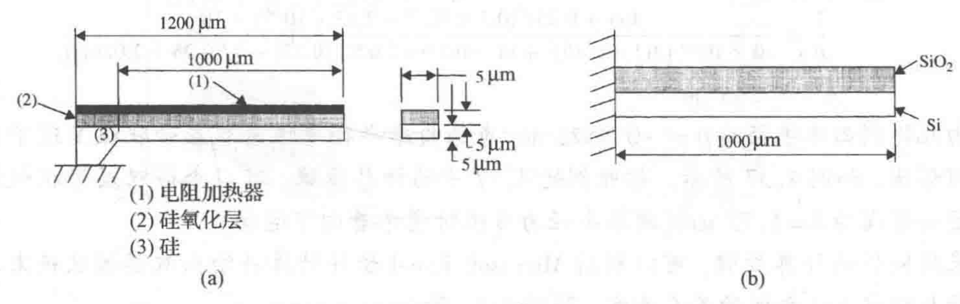


图4.39　双层带状板致动器：(a)整体尺寸；(b)用于分析的双层梁

解答：图4.39所示的双层带状板符合图4.38所描述的情形，因此可以使用方程(4.50)和方程(4.51)来计算厚度为 $h = 10 \times 10^{-6}$ m、宽度为 $b = 5 \times 10^{-6}$ m 的加热双层带状板的界面力和曲率半径。

只要把上面给出的材料性能参数以及双层带状板的尺寸代入方程(4.50)和方程(4.51)中，就能够计算得到界面力 F 和曲率半径 ρ 分别为：

$$F = \frac{(2.33 \times 10^{-6} - 0.5 \times 10^{-6})10}{8} \frac{(10 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-6})}{1/(385\ 000 \times 10^6) + 1/(190\ 000 \times 10^6)}$$

$$= 14.55 \times 10^{-6}\ \text{N}$$

$$\rho = \frac{2(10 \times 10^{-6})}{3(2.33 \times 10^{-6} - 0.5 \times 10^{-6})10} = 0.3643 \text{ m}$$

我们注意到界面力非常小，因此完全可以将其忽略不计。但是弯曲带状板的曲率半径则可以用来评估其自由端所发生的运动，它可以近似为如图4.40所示的情形。

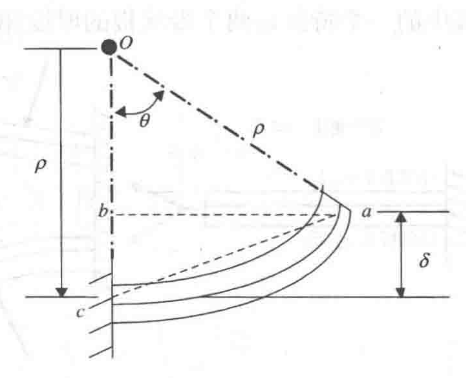
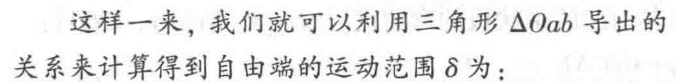


图4.40　双层带状板致动器自由端的运动

由于弧的曲率半径为$\rho = 0.3643$ m，因此对应的整个圆周长为$2\pi\rho = 2.2878$ m，而该弯曲带状板对应的弧角度θ可通过下式近似求得：



$$\frac{\theta}{\text{arc(ac)}} \approx \frac{\theta}{\text{line(ac)}} = \frac{\theta}{1000 \times 10^{-6}} = \frac{360}{2.2878}$$

由此得到$\theta = 0.1574°$。

这样一来，我们就可以利用三角形ΔOab导出的关系来计算得到自由端的运动范围δ为：

$$\delta \approx \rho - \rho\cos\theta = 0.3643 - 0.3643\cos(0.1574°) = 1.373 \times 10^{-6} \text{ m 或 } 1.373\ \mu\text{m}$$

例题4.18　采用例题4.17[①]中所描述的双层带状板作为电路中的微型开关，但是其中SiO_2薄膜的厚度缩减为2 μm，而总的双层带状板厚度h仍然维持在10 μm，这也就意味着硅梁的厚度增大到8 μm。(1)估算此双层带状板末端所发生的形变量；(2)绘出双层带状板末端形变量与膜厚之比t_1/t_2之间的关系曲线，其中t_1是SiO_2薄膜的厚度。

解答：我们在计算中将使用与例题4.17完全相同的双层带状板长度及材料特性参数。

1. 首先利用方程(4.49)来计算厚度比为$m = t_1/t_2 = 2/8 = 0.25$、杨氏模量之比为$n = E_1/E_2 = 385\,000/190\,000 = 2.026$的双层带状板的曲率半径：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6(1+0.25)^2(0.5 \times 10^{-6} - 2.33 \times 10^{-6}) \times 10}{10 \times 10^{-6}\left\{3(1+0.25)^2 + (1 + 0.25 \times 2.026)\left[0.25^2 + 1/(0.25 \times 2.026)\right]\right\}}$$
$$= -2.187 \text{ m}^{-1}$$

   由此得到曲率半径为$\rho = -0.4572$ m，负的曲率半径意味着双层带状板呈现下凹的几何形状，如图4.37所示。按照例题4.17中的计算步骤，可以求得双层带状板末端的运动范围为$\delta = 1.73$ μm(曲率半径为负值时意味着向下运动)。

2. 采用同样的计算步骤，可以利用Microsoft Excel软件计算并绘出双层带状板末端形变量与膜厚之比之间的关系曲线，如图4.41所示。

图4.41所示结果反映了在设计微型双层带状板时的一个有趣的现象，注意硅的热膨胀系数差不多是二氧化硅的5倍，而二氧化硅的刚度则是硅的2倍。不难设想，随着双层带状板膜厚之比的增大或者随着具有较高硬度的SiO_2材料厚度的增加，这种键合双层带状板末端的弯曲方向可能会发生逆转。因此可以得出如下结论，如图4.41所示，对于SiO_2膜厚较薄的双层带状板，其末端的运动范围主要由两种材料热膨胀系数的失配决定，如果双层带状板中采用了较厚的SiO_2薄膜，则材料热膨胀系数的主导作用又将被材料的刚度系数所取代。

---

① 原书此处误为例题4.16。——译者注

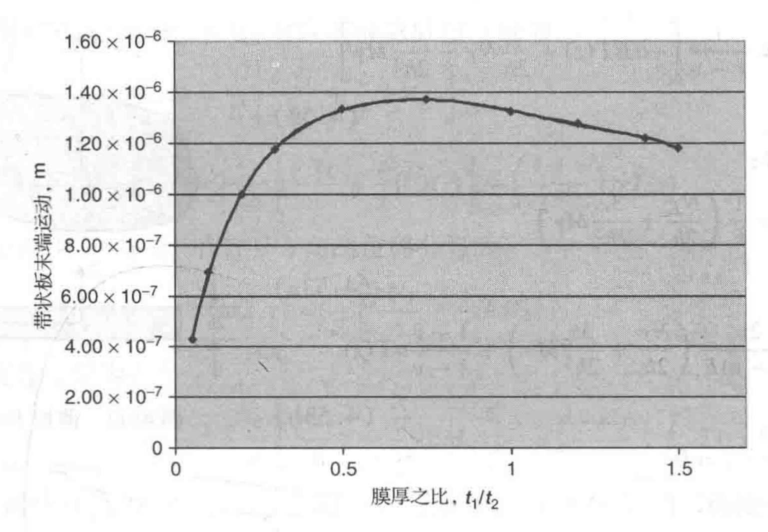


图 4.41　双层带状板末端形变量与膜厚之比的变化关系

热力学理论，包括对那些具有复杂的几何形状、载荷情况以及边界条件的结构进行的热弹塑性应力分析以及由于热效应所引起的这些相关结构的蠕变和断裂，都可以在[Hsu，1986]这本参考书中找到。对于上述热力学分析所要用到的有限元公式也可以在同一本书中找到。

正如我们在第 2 章中所了解到的，许多 MEMS 元件都呈现出薄板和薄梁的形状。我们将在后面的章节里概述这些结构单元中热应力分布的闭合解。这些公式的详细推导过程可以在一些资料中查到，如[Boley 和 Weiner，1966]。图4.42 给出了一个三维固体处于静力平衡条件下的应力和相关应变分量的定义，其中沿着 x、y、z 三个方向的位移分别被表示为 $u(x,y,z)$、$v(x,y,z)$ 和 $w(x,y,z)$。

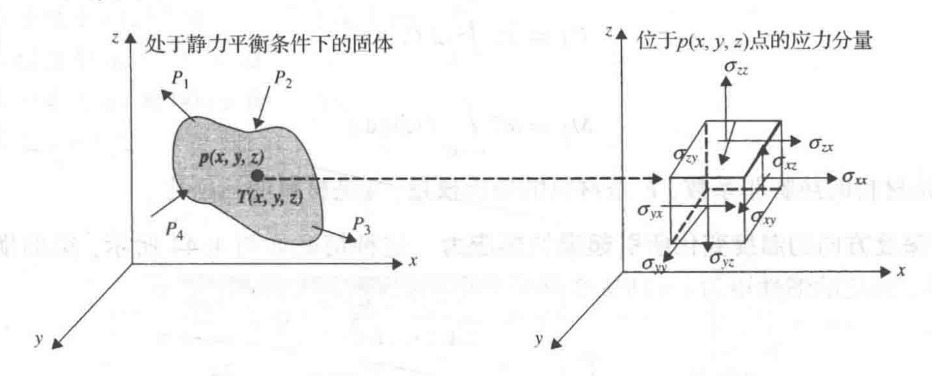


图 4.42　固体中应力和相关应变分量的表示方法

薄板中沿厚度方向的温度变化导致的热应力　图 4.43 描述了一个由笛卡儿坐标系定义的任意形状的薄板。假设该平板承受平面应力，这意味着在承受沿厚度方向的温度变化时，即 $T=T(z)$ 时，将会出现如下的应力情形：

$$\sigma_{xx}(x,y,z)=f_1(z)\quad \sigma_{yy}(x,y,z)=f_2(z)$$
$$\sigma_{zz}=\sigma_{xz}=\sigma_{yx}=\sigma_{yz}=0$$

热应力为：

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{1}{1-\nu}\left[-\alpha ET(z) + \frac{1}{2h}N_T + \frac{3z}{2h^3}M_T\right] \quad (4.52)$$

热应变则为：

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E}\left(\frac{N_T}{2h} + \frac{3z}{2h^3}M_T\right) \quad (4.53a)$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{2\nu}{(1-\nu)E}\left(\frac{N_T}{2h} + \frac{3z}{2h^3}M_T\right) + \frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha T(z) \quad (4.53b)$$

图 4.43 薄板中的热应力

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$$

各个位移分量分别为：

$$u = \frac{x}{E}\left(\frac{N_T}{2h} + \frac{3z}{2h^3}M_T\right) \quad (4.54a)$$

是沿着 x 轴方向的位移分量；

$$v = \frac{y}{E}\left(\frac{N_T}{2h} + \frac{3z}{2h^3}M_T\right) \quad (4.54b)$$

是沿着 y 轴方向的位移分量；以及

$$w = -\frac{3M_T}{4h^3E}(x^2+y^2) + \frac{1}{(1-\nu)E}\left[(1+\nu)\alpha E\int_0^z T(z)\mathrm{d}z - \frac{\nu z}{h}N_T - \frac{3\nu z^2}{2h^3}M_T\right] \quad (4.54c)$$

是沿着 z 轴方向的位移分量。

法向的热力 N_T和热力矩 M_T可以表示为温度 $T(z)$的函数：

$$N_T = \alpha E\int_{-h}^{h} T(z)\,\mathrm{d}z \quad (4.55a)$$

$$M_T = \alpha E\int_{-h}^{h} T(z)z\,\mathrm{d}z \quad (4.55b)$$

式中，α 是材料的热膨胀系数，E 是材料的杨氏模量，ν 是材料的泊松比。

沿着深度方向的温度变化所引起梁的热应力 这种情况如图 4.44 所示，梁的横截面积为 $A=2bh$，对应的惯性矩为 $I=2h^3b/3$。

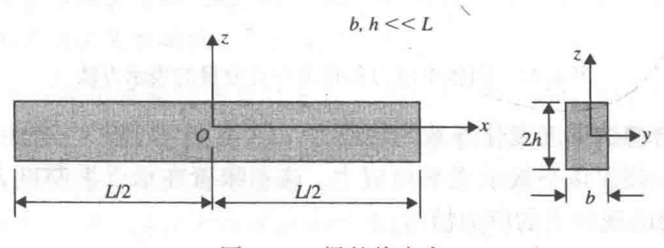


图 4.44 梁的热应力

弯应力 $\sigma_{xx}(x,z)$是主要的应力分量，它可以表示为：

$$\sigma_{xx}(x,z) = -\alpha ET(z) + \frac{bN_T}{A} + \frac{z(bM_T)}{I} \quad (4.56)$$

而其他的应力分量为 $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = 0$，对应的应变分量分别为：

$$\varepsilon_{xx}(x,z) = \frac{1}{E}\left[\frac{bN_T}{A} + \frac{z}{I}(bM_T)\right] \tag{4.57a}$$

$$\varepsilon_{zz}(x,z) = -\frac{\nu}{E}\left[\frac{bN_T}{A} + \frac{z}{I}(bM_T)\right] + \left(\frac{1+\nu}{E}\right)\alpha T(z) \tag{4.57b}$$

另外一个应变分量为 $\varepsilon_{xz} = 0$。沿着 x 方向的位移分量为：

$$u(x,z) = \frac{x}{E}\left[\frac{bN_T}{A} + \frac{z}{I}(bM_T)\right] \tag{4.58a}$$

沿着 z 方向的位移分量为：

$$w(x,z) = -\frac{bM_T}{2EI}x^2 - \frac{\nu}{E}\left[\frac{bN_T}{A}z + \frac{z^2}{2I}(bM_T)\right] + \alpha\left(\frac{1+\nu}{E}\right)\int_0^z T(z)\,\mathrm{d}z \tag{4.58b}$$

由热力 N_T 和热力矩 M_T 所引起的法向力和弯矩可以分别用式(4.55a)和式(4.55b)来表示。

弯曲梁的曲率可以按照下面的表达式来计算：

$$\frac{1}{\rho} \approx -\frac{bM_T}{EI} \tag{4.59}$$

式中，ρ 为弯曲梁的曲率半径。

例题 4.19 一个薄梁由附着在其上表面的铜薄膜对其进行 1 μs 的瞬间电阻加热，计算加热后该薄梁的热应力、应变和形变。加热后形成的上表面温度是 40℃，梁的形状和尺寸如图 4.45 所示。梁由硅材料制成，其材料特性如下：

质量密度 $\rho = 2.3\ \mathrm{g/cm^3}$

比热 $c = 0.7\ \mathrm{J/g\cdot℃}$

热传导率 $k = 1.57\ \mathrm{W/cm\cdot℃}$（或 $\mathrm{J/cm\cdot℃\cdot s}$）

热膨胀系数 $\alpha = 2.33 \times 10^{-6}/℃$

杨氏模量 $E = 190\,000 \times 10^6\ \mathrm{N/m^2}$

泊松比 $\nu = 0.25$

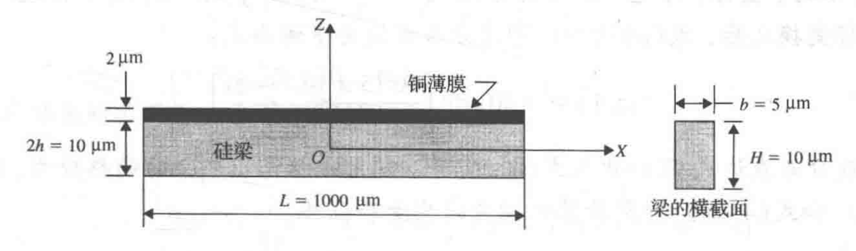


图 4.45 上表面加热的硅梁示意图

解答：对薄硅梁的上表面瞬时加热所产生的热应力、应变和位移可以通过式(4.56)、式(4.57)和式(4.58)来计算。但是，就如同在几乎所有的热应力分析中一样，我们还必须首先确定结构中的温度分布。

在目前这种情形下，我们需要获得沿着梁的厚度方向的温度变化，也就是在给定时间 t 时刻的温度分布 $T(z)$。

薄硅梁中的温度分布 $T(z,t)$ 既可以在适当的边界条件下通过热传导分析获得，这种方法将

在第5章中介绍，也可以从类似于图4.46所示的半无限空间加热情况的温度分布中得到合适的结果。

正如我们在第5章中将会介绍的那样，图4.46所示情形的数学模型可以用如下的偏微分方程和适当的初始条件及边界条件来表示：

$$\frac{\partial^2 T(y,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \qquad (4.60)$$

其初始条件为 $T(y,0)=0$，而边界条件则为 $T(0,t)=T_0$ 和 $T(\infty,t)=0$，相应的解的形式则为：

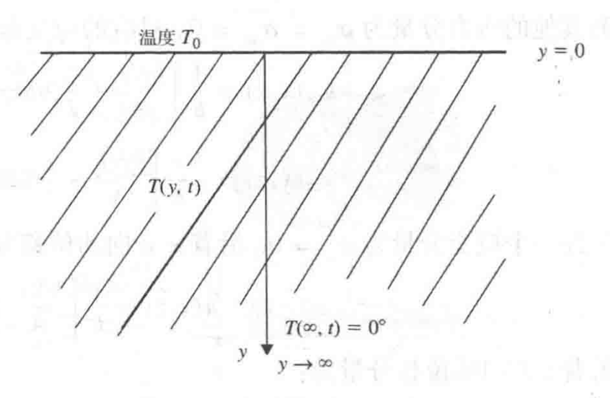


图4.46　半无限空间的温度分布

$$T(y,t) = T_0 \,\text{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \qquad (4.61)$$

式中，α 是固体的热扩散率。

所对应的当前情况下硅梁的热扩散率可以计算如下：

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} = \frac{1.57\ \text{J/cm}\cdot℃\cdot\text{s}}{2.3\ \text{g/cm}^3 \times 0.7\text{J/g}\cdot℃} = 0.9752\ \text{cm}^2/\text{s}$$

即硅的热扩散率为 $\alpha = 97.52\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$。

式(4.61)中的函数 erfc(x)是我们在第3章中介绍过的余误差函数。

因此，通过把相关的参数代入式(4.61)中，就可以获得硅梁的上表面在40℃下加热1 μs后沿着其厚度方向的温度分布为：

$$T(y,1\ \mu\text{s}) = 40\ \text{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{(97.52\times10^{-6})(10^{-6})}}\right) = 40\ \text{erfc}\left(\frac{10^6 y}{19.75}\right) \qquad \text{(a)}$$

要把上述求得的温度分布应用到图4.45所示的薄硅梁上，还需要将图4.46中的 y 坐标转换为图4.45所示的 z 坐标，即进行这样的变换：$z=-y+h$，或 $y=h-z$，其中 $h=5\ \mu\text{m}$。

经过坐标变换之后，式(a)所示的温度分布变换为下述形式：

$$T(z,1\ \mu\text{s}) = 40\ \text{erfc}\left[\frac{10^6(5\times10^{-6}-z)}{19.75}\right] \qquad \text{(b)}$$

将上面的温度分布表达式 $T(z)$ 代入式(4.56)中，就可以估算出1μs时的热应力，同时也可以根据式(4.57)和式(4.58a)分别计算出相应的应变和位移。

替代的数值解

对于目前的情形，要根据式(4.55a)和式(4.55b)来分别计算热力 N_T 和热力矩 M_T，就需要对式(b)所示的温度分布函数 $T(z,1\ \mu\text{s})$ 进行积分运算，而这个温度分布函数中又包含了余误差函数 erfc(z)。完成这个任务可以借助于诸如MATHCAD或MATLAB这样的数学软件。另外一种变通的方法是构造出一个多项式函数，它可以用来近似式(b)所表达的温度分布函数，然后利用该多项式函数求得当前问题的数值解。

利用图3.14中给出的误差函数的数值，可以估算出式(b)中余误差函数的数值，最终可

以求得沿着梁深度方向温度分布的数值解。在 $t=1\ \mu s$ 时温度 $T(z)$ 在不同位置处的分布如下表所示：

式(a)中的 y	式(b)中的 $z\times10^{-6}$ m	$\mathrm{erfc}\left[\frac{10^6(5\times10^{-6}-z)}{19.75}\right]$	1 μs 时的 $T(z)$ (℃)
0	5	0	40.00
1	4	0.0506	37.72
2	3	0.1013	35.44
3	2	0.1519	33.20
4	1	0.2025	30.38
5	0	0.2532	28.81
6	−1	0.3038	26.69
7	−2	0.3544	24.63
8	−3	0.4051	22.64
9	−4	0.4557	20.74
10	−5	0.5063	18.92

从上表中的数据可以看到，采用以下形式的线性多项式函数能够相当准确地拟合式(b)所表示的温度分布：

$$T(z)=2.1\times10^6z+28.8 \tag{c}$$

式中，z 是图 4.45 所示的坐标，其单位为 μm。

这样一来，我们就可以将式(c)所表示的 $T(z)$ 代入式(4.55a)和式(4.55b)中，从而求得热力和热力矩如下：

$$\begin{aligned}N_T&=\alpha E\int_{-h}^{h}T(z)\,\mathrm{d}z=(2.33\times10^{-6})(190\ 000\times10^6)\\&\quad\times\int_{-5\times10^{-6}}^{5\times10^{-6}}(2.1\times10^6z+28.8)\,\mathrm{d}z\\&=127.5\ \mathrm{N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_T&=\alpha E\int_{-h}^{h}T(z)z\,\mathrm{d}z=(2.33\times10^{-6})(190\ 000\times10^6)\\&\quad\times\int_{-5\times10^{-6}}^{5\times10^{-6}}(2.1\times10^6z+28.8)z\,\mathrm{d}z\\&=77.4725\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot m}\end{aligned}$$

接下来需要计算梁的截面积 A 和面积惯性矩 I：

$$A=(5\times10^{-6})(10\times10^{-6})=5\times10^{-11}\ \mathrm{m}^2$$

$$I=\frac{1}{12}bH^3=\frac{1}{12}(5\times10^{-6})(10\times10^{-6})^3=4.167\times10^{-22}\ \mathrm{m}^4$$

现在可以利用式(c)给出的温度分布来计算诱生出的热应力、应变和位移，根据式(4.56)可得：

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}(z,1\ \mu s)&=-(2.33\times10^{-6})(190\ 000\times10^6)(2.1\times10^6z+28.8)\\&\quad+\frac{(5\times10^{-6})127.5}{5\times10^{-11}}+\frac{z(5\times10^{-6})(77.4725\times10^{-6})}{4.167\times10^{-22}}\\&=-4.427\times10^5(2.1\times10^6z+28.8)+127.5\times10^5\\&\quad+92.96\times10^{10}z\quad\mathrm{Pa}\end{aligned}$$

把 $z=5\times10^{-6}$ m 代入上面的表达式，就可以求得加热 1 μs 之后的最大弯曲应力 $\sigma_{xx,\max}$，该弯曲应力为压应力，其数值为 $\sigma_{xx,\max}=-500$ Pa。

相应的热应变分量可以根据式(4.57a)和式(4.57b)计算如下：

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_{xx}(z) &= \frac{1}{190\,000\times10^{6}}\left[\frac{(5\times10^{-6})127.5}{5\times10^{-11}}+\frac{z(5\times10^{-6}\times77.4725\times10^{-6})}{4.167\times10^{-22}}\right]\\
&= 67.11\times10^{-6}(1+0.73\times10^{5}z)\\
\varepsilon_{zz}(z) &= 0.25(-67.11\times10^{-6})(1+0.73\times10^{5}z)\\
&\quad+\frac{1+0.25}{190\,000\times10^{6}}(2.33\times10^{-6})(2.1\times10^{6}z+28.8)\\
&= (-16.78\times10^{-6}-1.23z)+(3.22\times10^{-11}z+44.15\times10^{-17})
\end{aligned}
$$

最大应变出现在硅梁的上表面，把 $z=5\times10^{-6}$ m 代入到上面的公式中就可以求得它们的数值：

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_{xx,\max} &= \varepsilon_{xx}(5\times10^{-6}) = 91.61\times10^{-6} = 0.0092\%\\
\varepsilon_{zz,\max} &= \varepsilon_{zz}(5\times10^{-6}) = -22.93\times10^{-6} = -0.0023\%
\end{aligned}
$$

将位置坐标 $x=\pm500\times10^{-6}$m 和 $z=5\times10^{-6}$m 代入式(4.58a)和式(4.58b)中，即可求得硅梁表面两个自由端的位移分别为：

$$
\begin{aligned}
u &= \frac{500\times10^{-6}}{190\,000\times10^{6}}\left[\frac{(5\times10^{-6})127.5}{5\times10^{-11}}+\frac{(5\times10^{-6})(5\times10^{-6})(77.47\times10^{-6})}{4.167\times10^{-22}}\right]\\
&= 0.046\ \mu\text{m}\\
w &= -\frac{(5\times10^{-6})(77.47\times10^{-6})(500\times10^{-6})^{2}}{2(190\,000\times10^{6})(4.167\times10^{-22})}\\
&\quad-\frac{0.25}{190\,000\times10^{6}}\left[\frac{(5\times10^{-6})127.5}{5\times10^{-11}}(5\times10^{-6})\right.\\
&\quad\left.+\frac{(5\times10^{-6})^{2}(5\times10^{-6})(77.47\times10^{-6})}{2(4.167\times10^{-22})}\right]\\
&\quad+\frac{1+0.25}{190\,000\times10^{6}}(2.33\times10^{-6})\\
&\quad\times\int_{0}^{5\times10^{-6}}(2.1\times10^{6}z+28.8)z\,\mathrm{d}z = -0.612\ \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

弯曲梁的曲率则可以通过式(4.59)来估算：

$$
\frac{1}{\rho} = -\frac{(5\times10^{-6})(77.47\times10^{-6})}{(190\,000\times10^{6})(4.167\times10^{-22})} = -4.892\ \text{m}^{-1}
$$

4.5 断裂力学

许多MEMS器件包含了第2章中介绍的各类不同薄膜材料的组合。这些不同性质的材料通过各种不同的方法结合在一起，这些方法包括我们将要在第8章中介绍的微制造技术和第11章中介绍的微系统封装技术。这些组合的工艺技术包括化学和物理气相沉积、热扩散、焊接与粘附等技术。键合结构的界面处是最容易产生结构缺陷的地方，而断裂力学正是一种评价这些界面结构完整性的方法。

当有过大的垂直外力作用于键合界面上时，或者当有较大的剪切力作用在键合界面上时，键合界面处就有可能会发生断裂。我们可以应用线性弹性断裂力学(LEFM)的原理来进行 MEMS 和微系统的设计分析，从而减少键合界面可能出现的分离现象。

线性弹性断裂力学也是一门独立的工程训练课程，在本节中不可能详细介绍有关这方面的诸多细节，我们在本节中将要学习的只是线性弹性断裂力学理论中的一些基本概念以及一些可以应用于微结构设计的重要公式。

4.5.1　应力强度因子

我们来考虑如图 4.47 所示的处于应力场中的一块固体材料上出现的一个小裂纹。应力场有可能使得裂纹以 3 种不同的模式发生形变。这些形变模式如图 4.48 所示，它们分别是：模式 I，断开模式；模式 II，边缘滑移模式；模式 III，撕裂模式。

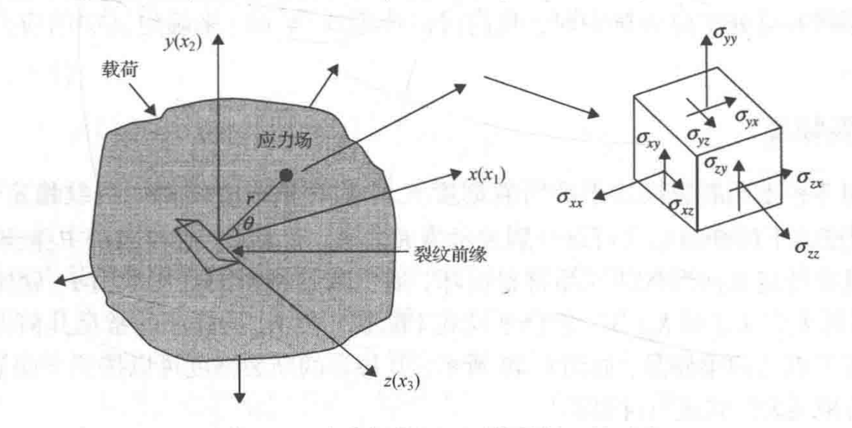


图 4.47　应力场作用下固体材料上的裂纹

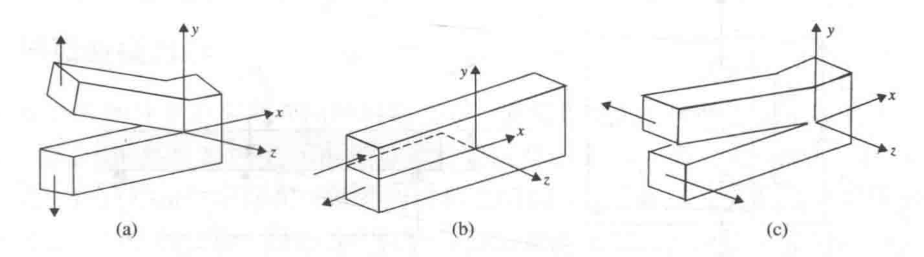


图 4.48　断裂的 3 种模式：(a)模式 I；(b)模式 II；(c)模式 III

断开模式(即模式 I)与局部的位移有关，发生局部位移时，裂纹表面趋向于沿着与表面垂直的方向分裂开来，该方向分别与 x-y 平面和 z-x 平面对称。边缘滑移模式(即模式 II)的特征是位移，在发生位移的过程中裂纹表面相互滑动，同时保持与裂纹前缘垂直，该方向与 x-y 平面对称并且与 x-z 平面反对称。撕裂模式(即模式 III)被定义为裂纹表面沿着平行于裂纹前端的方向相互滑动，该方向分别与 x-y 平面和 x-z 平面反对称。

在线性弹性断裂力学(LEFM)中引入的应力强度因子 K 是用来评估裂纹周边的应力场的。考虑图 4.47 所示的情形，裂纹周边的应力和位移分量可以分别表示为：

$$\sigma_{ij} = \frac{K_{\mathrm{I}}\ \text{或}\ K_{\mathrm{II}}\ \text{或}\ K_{\mathrm{III}}}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \tag{4.62}$$

$$u_i = K_{\mathrm{I}}\ \text{或}\ K_{\mathrm{II}}\ \text{或}\ K_{\mathrm{III}} \sqrt{r}\, g_i(\theta) \tag{4.63}$$

式中，K_{I}、K_{II}和 K_{III}分别是断裂模式 I、断裂模式 II 和断裂模式 III 所对应的应力强度因子。

式(4.62)中的应力分量 σ_{ij}与图 4.47 中所表示的应力分量是完全一样的，它的下标 i，$j=1$，2，3 表示坐标轴的方向(在图 4.47 中 $x_1=x$，$x_2=y$，$x_3=z$)。例如，在(x，y，z)坐标系中 $\sigma_{11}=\sigma_{xx}$，$\sigma_{23}=\sigma_{yz}$。在式(4.63)中我们以 u_i来表示距离裂纹尖端 r 的一个小单元所发生的位移，其中 $i=1$，2，3。式(4.62)和式(4.63)中的函数 $f_{ij}(\theta)$、$g_i(\theta)$取决于裂纹的长度 c 以及固体材料的几何形状。这些应用于不同几何形状固体结构的函数形式都可以在有关断裂力学的教科书中找到。

从式(4.62)中我们注意到当 $r\to0$ 时，应力 $\sigma_{ij}\to\infty$（裂纹尖端即位于 $r=0$ 的位置)。事实上，这种情况并不会出现，但是我们应该意识到应力会在尖缝顶端附近急剧增大。这种当 $r\to0$ 时所对应的应力 $\sigma_{ij}\to\infty$ 的情况称为裂纹尖端附近的应力奇点。

应用线性弹性断裂力学(LEFM)的原理，对于一个含有裂纹的特定结构，当该裂纹具有一定的几何形状并且处于应力场中时，我们可以依据式(4.62)来确定其中的应力强度因子 K_{I}、K_{II}和 K_{III}。

4.5.2 断裂韧度

可以采用各种不同断裂模式下的断裂韧度 K_C作为评估一个结构中裂纹稳定性的标准，3 种不同断裂模式下的断裂韧度可以分别表示为 $K_{\mathrm{I}C}$、$K_{\mathrm{II}C}$和 $K_{\mathrm{III}C}$。临界载荷 P_{cr}能够导致包含一个裂纹的具有特定几何形状的样品材料损坏，通过测量材料的临界载荷 P_{cr}就能够确定其 K_C的数值(包括 $K_{\mathrm{I}C}$、$K_{\mathrm{II}C}$和 $K_{\mathrm{III}C}$)。适合于模式 I 断裂韧度 $K_{\mathrm{I}C}$的样品的常见几何形状包括紧凑拉伸样品和三点弯曲梁样品，如图 4.49 所示，其各自的断裂韧度可以按照下面给出的关于模式 I 断裂的相关表达式进行计算。

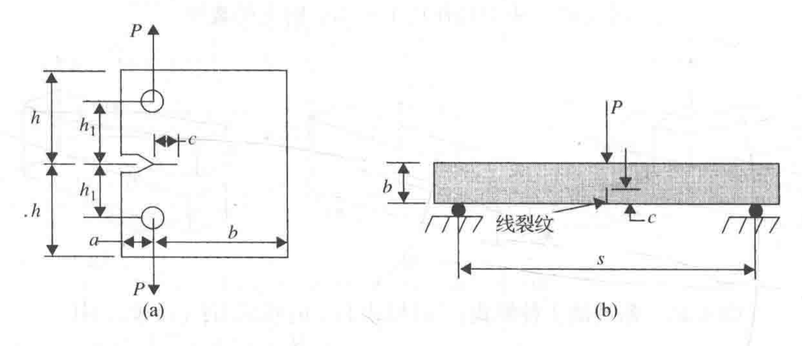


图 4.49 用来计算模式 I 断裂韧度的样品：(a)紧凑拉伸样品；(b)三点弯曲样品

对于如图 4.49(a)所示的紧凑拉伸(CT)样品：该样品受到一个拉伸力的作用，因而出现了一条裂纹。在该样品的中部切削出一个凹口来促使其发生断裂。由于低载荷的疲劳负载效应，在凹口的顶端将会产生一个长度为 c 的微小裂纹。这个微小裂纹在外加载荷的作用下逐渐成长，并随后开始不稳定的扩展。CT 样品材料的断裂韧度可以根据下面给出的公式进行计算：

$$K_{\mathrm{I}C}=\sigma_C\sqrt{\pi c}F\left(\frac{c}{b}\right) \tag{4.64}$$

式中，c 是裂纹长度；$\sigma_c=P_{cr}/A$，其中 P_{cr}是引起样品裂纹扩展断裂的外加载荷 P，A 是样品的横截面积。

式(4.64)中的函数 $F(c/b)$ 值可以在断裂力学手册中查到。如果手头上找不到这样的参考数据，也可以使用 $F(c/b)=1$ 这样的近似值。这个近似值适用于样品受到均匀拉伸载荷的情况。

用来计算断裂韧度的紧凑拉伸样品在几何尺寸上必须满足下面的规范要求[如图 4.49(a)所示]:

$$h=0.6b \quad h_1=0.275b \quad D=0.25b \quad a=0.25b$$

样品的厚度为 $T=b/2$。

对于如图 4.49(b) 所示的三点弯曲样品：式(4.64)所示的表达式仍然能够用于计算样品材料的断裂韧度，只是其中的函数 $F(c/b)$ 必须采用下面的形式：

当 $s/b \leqslant 4$ 时，

$$F\left(\frac{c}{b}\right)=1.09-1.735\left(\frac{c}{b}\right)+8.2\left(\frac{c}{b}\right)^2-14.18\left(\frac{c}{b}\right)^3+14.57\left(\frac{c}{b}\right)^4 \tag{4.65a}$$

当 $s/b \leqslant 8$ 时，

$$F\left(\frac{c}{b}\right)=1.107-2.12\left(\frac{c}{b}\right)+7.71\left(\frac{c}{b}\right)^2-13.55\left(\frac{c}{b}\right)^3+14.25\left(\frac{c}{b}\right)^4 \tag{4.65b}$$

对于特定的样品材料，根据临界载荷 P_{cr} 的测量而计算得到的断裂韧度通常被用作一个设计标准，这类似于在常规的机械设计中用到的安全应力。实际上，工程师们通常会借助应力分析来计算结构中某个假想的具有一定尺寸和方向的裂纹周围的应力场。可以采用式(4.62)来计算应力强度因子 K_{I}、K_{II} 和 K_{III}，再将这样计算得到的应力强度因子与相应的断裂韧度 K_{IC}、K_{IIC} 和 K_{IIIC} 进行比较，如果计算出的 K 值超出相应的断裂韧度，就意味着结构会发生断裂。在大多数情况下，只需考虑主要的断裂模式，即模式 I。因此如果计算出的 K_{I} 值小于指定的 K_{IC}，则被认为是安全情况，在这种情况下，裂纹可以被看作是稳定的。

4.5.3 界面断裂力学

很多 MEMS 器件是由多种不同材料键合在一起而形成的，例如图 2.8 和图 2.9 所示的压力传感器、图 2.18 和图 2.19 所示的微型致动器以及图 2.41、图 2.42 和图 2.43 所示的微型阀和微管道。在这些器件中存在很多不同材料之间的界面。由于大多数这类器件都要求能够正常运行数百万个工作周期，因此这些键合界面的强度就变成了设计工程师特别关注的一个重要问题。

对界面断裂强度的分析评估要比前面章节中所介绍的单一模式断裂情形复杂得多。一个主要难点在于大多数界面会同时受到模式 I 和模式 II(在某些情况下甚至还包括模式 III)的复合载荷作用。这种混合模式的断裂分析是与我们已经建立的单一模式断裂分析方法截然不同的，在这里我们仍然只是概括性地介绍求解这类问题的一个总体思路。

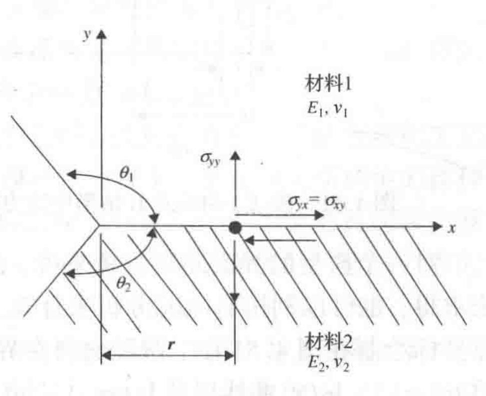


图 4.50　双材料结构中的界面

我们来考虑如图 4.50 所示的一个键合双材料结构中的界面，其中的两种键合材料具有完全不同的性能参数，例如其杨氏模量分别为 E_1 和 E_2，泊松比分别为 ν_1 和 ν_2。该界面在垂直方向和横向的剪

切方向分别受到应力场σ_{yy}和σ_{xy}的同时作用，这些应力场使得界面很容易受到断开模式(模式I)和剪切模式(模式II)这种双重断裂的作用。

界面裂纹附近无论是材料1还是材料2中的应力σ_{ij}(其中$i,j=x,y$)可以采用下面的公式来反映，该表达式与式(4.62)类似：

$$\sigma_{ij}=\frac{K_{\mathrm{I}}\text{ 或 }K_{\mathrm{II}}}{r^{\lambda}}+L_{ij}\ln(r)+\text{其他高阶项}$$

式中，K_{I}和K_{II}分别是按照模式I和模式II断裂的应力强度因子；λ是奇点参数；L_{ij}则是常数。

在靠近界面顶端的区域内(即当距离r非常小)时，可以忽略$\ln(r)$项对应力场的贡献，因此就可以得到界面顶端附近的应力，此时应力奇点决定了应力的分布：

$$\sigma_{ij}=\frac{K_{\mathrm{I}}\text{ 或 }K_{\mathrm{II}}}{r^{\lambda}} \tag{4.66}$$

根据上述表达式可以得到沿着界面的应力分量分别为：

$$\sigma_{yy}=\frac{K_{\mathrm{I}}}{r^{\lambda_{\mathrm{I}}}} \tag{4.67a}$$

$$\sigma_{xy}=\frac{K_{\mathrm{II}}}{r^{\lambda_{\mathrm{II}}}} \tag{4.67b}$$

式中，λ_{I}和λ_{II}分别是材料以模式I和模式II断裂时的奇点参数。

式(4.67a)和式(4.67b)中的应力强度因子K_{I}和K_{II}可以通过对上述两个方程取对数后进行线性化处理得到：

$$\ln(\sigma_{yy})=-\lambda_{\mathrm{I}}\ln(r)+\ln(K_{\mathrm{I}}) \tag{4.68a}$$

$$\ln(\sigma_{xy})=-\lambda_{\mathrm{II}}\ln(r)+\ln(K_{\mathrm{II}}) \tag{4.68b}$$

式(4.68a)和式(4.68b)可以分别用图4.51(a)和图4.51(b)中的图形来表示。在图4.51中，r_0表示距离裂纹尖端的一个较短的范围，在该范围内应力按照线性规律变化；而r_e则是与裂纹尖端相距最近的一个距离，在该距离内可以通过有限元分析方法获得应力的具体数值。

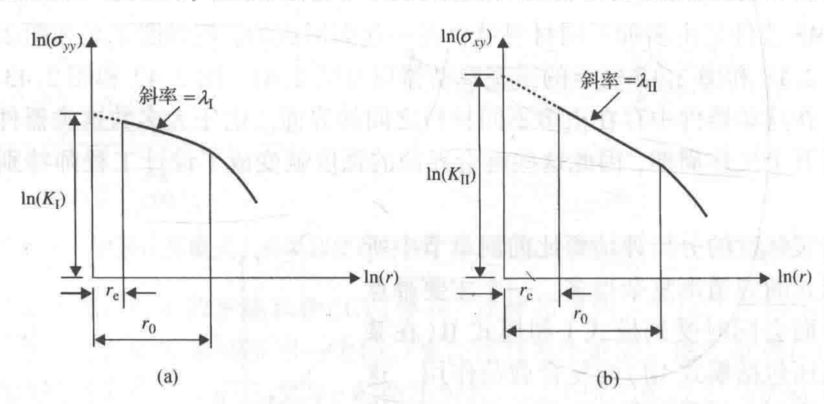


图4.51 模式I和模式II情形中应力强度的图形表示：(a)模式I断裂；(b)模式II断裂

对一个典型的界面断裂分析来说，两种材料中沿着界面的应力分布既可以采用经典方法求得，也可以利用有限元分析来计算。把两种相连材料界面附近的应力分布按照自然对数坐标绘制在图4.51中，两种材料在界面附近的应力强度因子K_{I}和K_{II}就可以分别从各自的$\ln(\sigma_{yy})\sim\ln(r)$曲线以及$\ln(\sigma_{xy})\sim\ln(r)$曲线在$y$坐标轴上的截距获得，而两条曲线近似直线部分的斜率则分别代表了两种断裂模式的奇点参数λ_{I}和λ_{II}。

把根据上述方法得到的两种相连材料的应力强度因子K_I和K_{II}输入到下面的混合模式断裂判别方程中：

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2+\left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2=1 \tag{4.69}$$

式中，两种相连材料的断裂韧度K_{IC}和K_{IIC}可以通过实验方法来确定。有关一些微电子材料在模式 I 和模式 II双重断裂作用下的断裂韧度数据库已经有所报道[Nguyen 等人，1997]。式(4.69)可以形象化地用一个1/4 的椭圆来表示，如图 4.52 所示。如果通过上述计算方法得到的K_I和K_{II}值位于椭圆覆盖的范围内，则该两种材料的界面就可以认为是安全的。

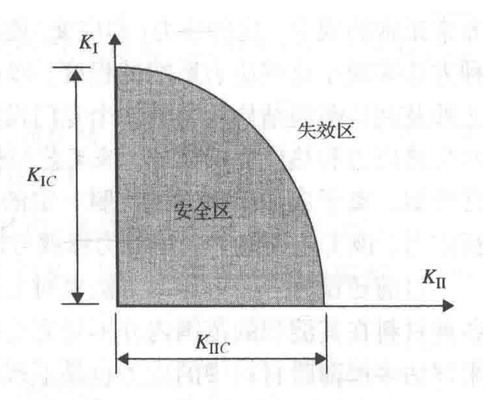


图 4.52　界面的断裂判断标准

以上有关多层材料界面断裂的分析技术看起来非常简单明了，然而目前能够获得的有关 MEMS 和微系统中这类材料双重断裂韧度的数据库还非常有限，因此这种方法的实际应用也就受到了很大的限制。

4.6　薄膜力学

正如从第 8 章将要介绍的各种微制造技术中可以了解到的那样，人们通常习惯于把由各种不同材料构成的薄膜淀积在某个衬底上或者是其他薄膜上。在 MEMS 和微系统中之所以要制备这些薄膜，或者是为了形成所要求的三维几何结构，或者是为了获得必要的功能特性，例如在微光学器件的反射表面涂敷一层薄膜以及在一些精密的核心元件表面形成一层钝化保护薄膜。这些薄膜的厚度在亚微米级到几个微米之间，它们或者需要在很多微器件中承载一定的负荷，或者需要保持具有特定几何尺寸稳定性的表面状况。因此，有关薄膜的这些机械特性就成了设计工程师们主要关注的问题。

化学与物理气相淀积以及其他工艺技术，例如氧化和外延，是 MEMS 和微系统中用来制备薄膜材料的几种常用的工艺技术。大多数这类化学气相淀积工艺都涉及到提高环境温度和降低气压，而很多物理气相淀积工艺诸如溅射技术则牵涉到淀积材料的离子对于衬底材料的轰击。几乎所有的这些淀积技术在完成工艺制备之后都会导致材料表面的弯曲。

薄衬底材料在淀积薄膜之后发生曲率变化的主要原因是这些淀积工艺诱生引起的寄生应力和应变，这种固有的应力有两种常见的类型，即残余应力和本征应力。

薄膜结构中的残余应力是由于过量的热应力而引起的，该热应力起源于高温淀积工艺过程中薄膜材料与衬底材料之间热膨胀系数的失配。薄膜在完成工艺制造之后所诱生的这种不可恢复的应变会导致固有的残余应力与应变，这种残余应力与应变使得平整的衬底表面发生弯曲。对于硅衬底在 1000℃时通过热氧化工艺生长 4 μm 厚二氧化硅薄膜的过程进行有限元分析表明，二氧化硅薄膜中会产生高达 2000 MPa 的残余压应力[Hsu 和 Sun，1998]，这个结果与[Madou，1997]给出的薄膜中残余应力一般在 10～5000 MPa 范围内基本相符，上述同一份参考文献还指出硅衬底上淀积的金属薄膜中的残余应力一般在 10～100 MPa 之间，但是该残余应力是张应力，这种张应力能够引起金属薄膜的龟裂。

薄膜结构中的本征应力主要是由于低温物理淀积工艺(例如溅射工艺)过程中薄膜材料内部的晶粒重新聚集而引起的，这种应力也会导致衬底材料的表面发生弯曲[Zhang和Misra，2004]。

各类薄膜材料在MEMS和微系统中的工艺制造过程中所诱生出的这些固有应力是一种非常正常的现象，这些应力(和应变)能够严重地影响器件预期的功能。工程师们通常采用两种方法来减小这些应力影响的程度，即退火处理和离子束加工[Bifano等人，2002]。退火工艺涉及到将薄膜结构放置到一个专门设计的热环境中并维持一段时间，从而将薄膜结构中的残余热应力和热应变释放掉，该工艺与传统的机械制造加工过程中金属材料的热退火技术非常类似。离子束加工则通过按照一定的顺序来去除材料从而释放出薄膜结构中"锁定"的本征应力，该工艺类似于采用应力释放方法进行薄膜结构的残余应力测量[Osgood，1954]。

目前还没有十分可靠的方法来对上述这些薄膜应力进行定量的评估，因为在多层薄膜中各种材料在其淀积的范围内并不是完全均匀分布的，因此使用材料平均特性的连续力学理论来评估多层薄膜材料中的应力也是不现实的。

在一个厚衬底上淀积的薄膜中总应力 σ_T 可以表示为下述形式[Madou，1997]：

$$\sigma_T = \sigma_{\text{th}} + \sigma_m + \sigma_{\text{int}} \tag{4.70}$$

式中，σ_{th} 为4.4节中介绍的由工作温度诱生的热应力；σ_m 是由外加的机械载荷所引起的应力；σ_{int} 为固有的本征应力。

在式(4.70)中，前两项应力分量的数值估算经常要用到有限元分析方法，而固有的本征应力的计算则通常是根据相应的测量技术或者是工程师们自己的经验得出的一些经验方法来进行[Bifano等人，2002；Zhang和Misra，2004]。

4.7 有限元应力分析概述

几乎所有的MEMS和微系统都包含复杂的三维几何结构。这些器件通常都是在严格的高温和机械作用条件下制造出来的，同时在其工作过程中也会承受较大的负载。此外，这些结构往往是由多层不同薄膜材料组成的，而且这些薄膜材料一般是通过物理或化学手段键合在一起的。因此很难根据本章中介绍的带有闭合解的传统方法来对这些复杂的系统进行可靠的应力分析。有限元方法(FEM)是目前唯一能够获得可信解的有效途径。下面将给出有关这种强有力方法的简单介绍。有关有限元方法的理论和公式在此就有意识地省略了，它们可以在一系列的参考资料[Hsu，1986；Hsu和Sinha，1992；Desai，1979]中找到。推导关键单元方程用到的基本理论将在第10章中介绍。读者在下面将要学习的是使用商业化的有限元分析程序所要求的基本输入/输出信息，这类商业化程序包括MEMS产业界广泛使用的ANSYS程序等。

4.7.1 原理

从本质上说，有限元方法(FEM)的基本原理就是"分割求解"。有限元分析(FEA)的第一步就是把由连续介质组成的固体结构从整体上分成有限数量具有特定形状的子结构(这些子结构被称为单元)，这些单元在其顶点或边缘上特定的点(被称为节点)处相互连接。各种不同几何结构的单元通常都可以从大多数商业化的程序软件提供的单元库中获得。

一旦整个结构被划分成大量的单元(这个过程称为离散化)之后，就要对这些单元而不是整个结构进行工程分析。在单元层次上获得的解最终可以组合得到整个结构的相关解。

通过对相关结构进行智能化的离散化处理之后，有限元分析(FEA)可以获得可靠的结果。在这个过程中需要遵循以下两个主要原则：

1. 在结构的几何形状发生突变的区域应划分更密和更小的单元，因为这些地方通常都是高应力和应变集中发生之处。
2. 避免使用具有较大长宽比的单元，该长宽比定义为在同一单元里最长方向尺寸与最短方向尺寸的比例，建议使用者保持该长宽比在 10 以下。

图 4.53 显示了一个微型压力传感器的硅芯片/振动膜/固定衬底的离散化结构[Schulze, 1998]。由于这种芯片/振动膜/固定衬底具有四面对称结构，因此在有限元分析模型中只包含了 1/4 的传感器单元结构。

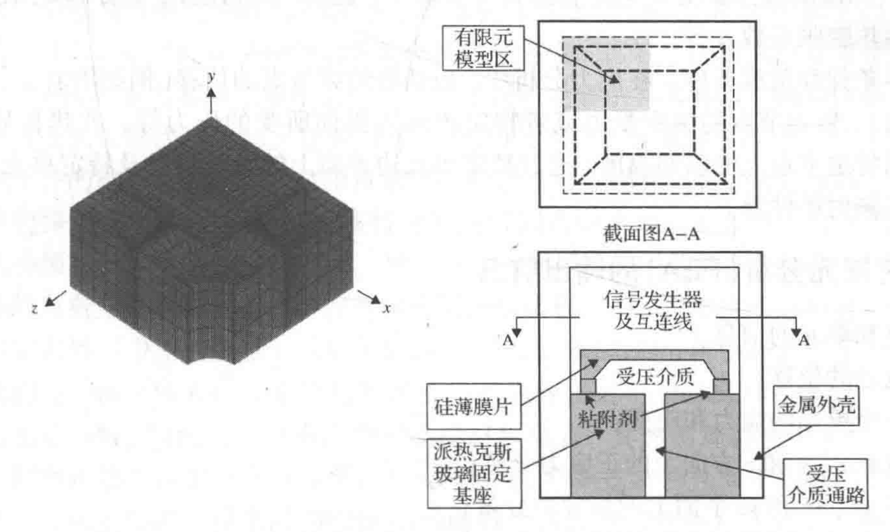


图 4.53　微型压力传感器结构中的硅芯片/固定衬底的有限元模型

4.7.2　工程应用

有限元方法(FEM)在几乎所有的工程学科中都有可能会用到，特别是在以下 3 个方面已经有非常成熟的应用，这些方面恰好对微系统的设计也是十分必要的。

1. **固体结构的应力/应变分析**：有限元方法(FEM)可以提供离散化模型中每一个单元的应力{σ}、应变{ε}和位移{U}求解结果，在这种分析中位移通常是要求解的主要未知量。
2. **热传导分析**：它能够处理包括传导、对流和辐射在内的所有热传递模式，并能处理诸如热流量{q}等各种边界条件以及对流/辐射等类型，可获得的预期结果包括每个单元里或节点位置处的温度。
3. **流体动力学**：用于流体动力学分析的有限元方法(FEM)程序是基于 Navier-Stokes 方程建立的，我们将在第 5 章中对其进行介绍。数值解将包括所选定的具有一定体积流体的质量流量、速度和驱动压力等。

4.7.3 有限元分析(FEA)的输入信息

1. 一般信息：

 a. 结构的几何形状轮廓。

 b. 建立坐标系：用于平面分析的 x-y 坐标系，用于轴对称分析的 r-z 坐标系，用于三维空间分析的 x-y-z 坐标系。

2. 建立有限元分析的网格(如图4.53所示)。为了便于自动生成网格，使用者通常需要指定特定区域里所希望的节点密度和单元密度。有限元分析所需的信息包括：节点数量、节点坐标、节点的条件(例如约束、外力和温度)、单元数量、单元的描述(例如单元的名称及其包含的节点)。

3. 输入材料属性：在应力分析中，包括杨氏模量 E、泊松比 ν、剪切弹性模量 G、屈服强度 σ_y 和极限抗拉强度 σ_u 等。在热传导分析中，包括质量密度 ρ、热导率 k、比热容 c 和线性热膨胀系数 α 等。

4. 边界条件和负载条件。在应力分析中，包括受约束节点的位移(例如沿着 x、y、z 三个方向)、特定节点的集中受力或者特定单元边界面所受的压力等。在热传导分析中，包括特定节点上的已知温度、通过特定单元边界面上的热流量以及特定单元表面的对流或辐射条件等。

4.7.4 有限元分析(FEA)的输出信息

1. 节点和单元的信息。

2. 节点处的位移。

3. 每一个单元的应力和应变：

 a. 沿着 x、y 和 z 方向上的正应力分量；

 b. 在 xy、xz 和 yz 平面上的切应力分量；

 c. 正应变和切应变分量；

 d. 最大主应力分量和最小主应力分量；

 e. von Mises 应力，其定义为：

$$\overline{\sigma}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{xx}-\sigma_{zz})^2+(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2+6(\sigma_{xy}^2+\sigma_{yz}^2+\sigma_{xz}^2)} \quad (4.71)$$

 式中，σ_{xx}、σ_{yy} 和 σ_{zz} 分别是单元中沿着 x、y 和 z 轴的应力分量，而 σ_{xy}、σ_{yz} 和 σ_{zx} 则分别是单元中的切应力分量，如图4.42所示。方程(4.71)中的 von Mises 应力则是多轴应力条件的等效应力。通过它与材料的屈服强度 σ_y 相比较来判断塑性屈服点，或者通过它与材料的极限抗拉强度 σ_u 相比较来预测结构的断裂点。

4.7.5 图形化输出

所有现代的商业化有限元分析(FEA)程序都能够提供如下形式的图形化输出：

- 有关结构的实体模型，例如图10.34所示的微型夹钳；
- 用户输入已经进行有限元网格划分的离散化实体结构，例如图4.53所示的微型压力传感器芯片；

- 一个已经发生形变或没有发生形变的结构的实体模型；
- 用不同色彩分类的区域来反映结构中所选定平面上的应力、应变和位移的分布；
- 用不同色彩分类的区域来反映其他要求输出的变量，例如结构中的温度或压力；
- 用动画来显示结构在特定工作条件下发生的运动或形变。

4.7.6 总体评论

有限元方法(FEM)已经被 MEMS 和微系统产业广泛用来进行系统的设计分析和模拟仿真。事实上，由于 MEMS 和微系统本身所固有的复杂几何形状以及负载与边界条件，只有有限元方法(FEM)看起来是唯一可用于完成此项任务的工具。但是用户必须牢记以下几点有关 MEMS 和微系统设计分析与模拟仿真的事实：

1. 工程师们必须记住有限元方法(FEM)对于所要求解分析的问题只能提供一个近似解。用户必须灵活地使用有限元程序才能够获得可靠的结果。正如在 4.7.1 节中所提到的，用户必须通过在结构中的几何形状发生突变的区域采用更为密集且更加微小的单元，来辨识应力和应变集中的位置。为了保持足够的计算精度，同样也必须避免使用具有较大长宽比的单元。这种对于长宽比的限制使得 MEMS 与微系统中各类薄膜结构元件的离散化变成了一件很难解决的问题。对于结构元件(例如目前已有的单元库中的弹簧和接触元件)中的一些特殊的热机械功能来说，要选择出合适的单元，就要求必须具备一定的知识和经验。另一个与用户相关的问题是在离散化的模型中建立正确的负载条件和边界条件。在很多有限元分析程序中，需要将压力负载正确地转换成相应边界面中相邻节点上的集中力，这个问题在瞬态热分析中经常会变得更加复杂。
2. 我们必须确定输入供分析的材料属性的可靠性。由于 MEMS 与微系统产业的历史相对比较短暂，因此对于制造这些产品的材料而言，其热物理特性大多数也比较缺乏。我们将在第 7 章中给出一些相关的材料特性，但是这些特性对于正确的设计分析来说还是远远不够的。用来对 MEMS 结构的行为特性进行建模和仿真的一些必要的数据资料目前还无法获得，这些数据资料包括 4.5 节中介绍的界断裂韧度和 4.6 节中介绍的本征应力模式等。科学家和工程师们正在努力建立更加完整的材料数据库。因此用户在进行有限元分析的过程中必须特别注意选择输入的材料特性。
3. 除非特别说明，用户应该记住，大多数商业化的通用有限元分析程序都是在连续系统理论的基础上开发出来的。一个典型的例子就是诸如固体力学中的广义胡克定律或热传导理论中的傅里叶定律这样一些基本关系的普遍使用。连续介质力学理论和热传导理论对于宏观系统而言都是经过长期实践检验的，但是它们对于亚微米尺度的 MEMS 和微系统元件来说则并非完全正确。因此我们不能将各种商业化的有限元分析程序不加选择地用于亚微米尺度的 MEMS 与微系统的设计分析中。
4. 根据 4.6 节介绍的内容，读者可能已经认识到，要预测由多层薄膜或不同材料键合得到的元件所组成的 MEMS 与微系统的机械特性是非常困难的。这些元件在制造过程中会在结构中产生不可避免的残余应力和本征应力。正如我们在本书后面的章节中将要了解到的那样，各种微制造工艺实际上都会在 MEMS 与微系统中引起这种不利的影响。要在设计分析中考虑这些效应的影响，就必须将有限元分析(FEA)方法与微制造工艺紧密结合起来。一些计算机辅助设计(CAD)软件包的开发商已经在上述结合方

面做出了努力，这部分工作将在第10章中介绍。我们在这里提醒读者，在使用商业化的有限元分析程序进行设计分析时必须意识到这个问题的存在。

尽管目前能够用到的最高水平的商业化有限元分析程序还存在着上面提到的各种缺点，但是对于工程师们来说，它们仍然是唯一可行的用于MEMS与微系统设计和仿真的有效方法。不过工程师们也要知道，就像能工巧匠们使用的很多工具一样，有限元方法(FEM)的强大威力也体现在使用者的智慧上。使用者首先必须牢固掌握有关该工具的丰富知识，并充分了解其局限性，然后才有可能最大限度地发挥该工具的作用。

本章习题

第一部分：多项选择

1. 在通常情况下，用于连续介质的工程力学原理可以被用于尺寸为________的MEMS元件。
   (1)大于1 nm；(2)大于1 μm；(3)大于1 cm
2. 薄板弯曲理论可以被用来处理微型压力传感器薄膜片上的________。
   (1)仅仅是形变；(2)仅仅是应力；(3)形变和应力
3. 对于微型压力传感器来说，正方形的膜片形状是________。
   (1)最常见的；(2)比较常见的；(3)最不常见的
4. 从力学的观点来看，最合适的微型传感器薄膜片的几何形状为________。
   (1)圆形；(2)正方形；(3)长方形
5. 在微加速度计设计中用到的主要原理是________。
   (1)板面弯曲；(2)机械振荡；(3)材料强度
6. 微器件固有的特征频率是由它的________所决定的。
   (1)质量；(2)结构刚度；(3)质量和结构刚度
7. 理论上微器件有________固有的特征频率。
   (1)1个；(2)几个；(3)无穷多个
8. 试图确定微器件中的几个或者全部固有特征频率的分析方法称作________。
   (1)模态分析；(2)振动分析；(3)模型分析
9. 对于一个由弹性材料构成的器件来说，当策动力的频率________其任一固有特征频率时，该器件就会发生共振。
   (1)接近；(2)等于；(3)超过
10. 在一个质量-弹簧振荡系统中，缓冲器可以对系统起到________的作用。
    (1)阻尼；(2)加速；(3)减速
11. 在大多数微加速度计的设计中，阻尼效应是________。
    (1)非常重要的；(2)比较重要的；(3)不重要的
12. 当振动质量块的输入频率增加时，可压缩流体提供的阻尼效果会________。
    (1)增加；(2)减少；(3)保持不变
13. 在平衡力微加速度计中，梁-质量块的移动通常可以用________来测量。
    (1)压敏电阻；(2)压电效应；(3)电容的变化
14. 当轴向的拉力增大时，振动梁的固有特征频率将会________。
    (1)增加；(2)减少；(3)保持不变
15. 在________的情况下，受到机械约束的微器件组件中将会诱生出热应力。
    (1)温度均匀升高；(2)温度不均匀升高；(3)任何温度升高

16. 由不同材料构成的微器件组件中诱生出热应力的原因是________。
    (1) 材料热膨胀系数的差别；(2) 键合界面处的缺陷；(3) 材料键合后的退化
17. 在机械约束的微器件组件中，热应力会因为________而诱生出来。
    (1) 均匀的温度变化；(2) 非均匀的温度变化；(3) 随时间恒定的温度
18. 材料的蠕变特性在________时将会变得严重。
    (1) 任何温度；(2) 高于熔点的一半；(3) 高于同源熔点的一半
19. 材料同源熔点的定义和熔点一样是以________为单位的。
    (1) 热力学温度；(2) 摄氏温度；(3) 华氏温度
20. 微系统中特别容易引起蠕变失效的部位是________。
    (1) 金属焊点处；(2) 环氧树脂结点处；(3) 硅酮橡胶结点处
21. 在微器件内部的界面处一般有________种断裂模式。
    (1) 2；(2) 3；(3) 4
22. 微结构中最常发生的断裂失效模式是________。
    (1) 模式 III；(2) 模式 II；(3) 模式 I
23. 微器件内部的界面处容易发生________模式的混合失效。
    (1) I 和 II；(2) I 和 III；(3) II 和 III
24. 对微结构界面处的断裂力学分析要求获得界面附近________的分布情况。
    (1) 正应力；(2) 切应力；(3) 正应力和切应力
25. 有限元方法是一种适用于具有________的微结构分析工具。
    (1) 简单几何结构；(2) 复杂几何结构和负载/边界条件；(3) 复杂负载条件和边界条件
26. 有限元分析的第一步是________。
    (1) 求出近似解；(2) 建立控制方程和边界条件；(3) 进行离散化处理，将连续体划分为一系列的子单元
27. 有限元分析中的主要未知量是________。
    (1) 公式中出现的变量；(2) 最重要的变量；(3) 最希望确定的变量
28. 用有限元方法进行应力分析的主要未知量是________。
    (1) 应力；(2) 应变；(3) 位移
29. 有限元分析中的基本关系涉及________。
    (1) 适当的计算公式的建立；(2) 主变量和其他的基本变量；(3) 负载条件和边界条件
30. von Mises 应力代表________。
    (1) 遵循 von Mises 原理的应力分量；(2) 某种特殊材料中的应力；(3) 复杂几何结构中的应力

第二部分：计算题

1. 采用第 7 章中表 7.3 给出的材料特性参数来求解例题 4.1 中所给定条件下圆形振动膜的最大挠曲，其中的圆形振动膜是采用金属铝制造的。
2. 若压力传感器正方形膜板(diaphragm)上施加 350 MPa 的应力即可产生出可测量的输出信号，则该膜板的厚度要求为多厚？该振动膜是从一个直径 100 mm 的(100)晶面的硅晶圆片上切割下来的硅芯片的一部分(也就是如图 4.6 所示从底面到腔中有一个 54.74°的倾斜角)，硅芯片平面的面积为 3 mm × 3 mm，芯片正面承受75 MPa的媒介压力，我们已知直径 100 mm 硅晶圆片的厚度为 500 μm，硅芯片底部支撑边的宽度假设为 250 μm。
3. 推导如图 4.18 所示的两段梁式弹簧系统的等效弹性常数。
4. 如图 4.54 所示，一个质量为 5 g 的微器件组件附着在一个硅条的下方，该硅条的等效弹性常数为 18 240 N/m。质量块组件和弹性硅条都是由硅材料制成的。质量块最初被下拉 5 μm，然后释放开。试确定：(a) 该质量块–弹簧系统固有的特征频率；(b) 该系统的最大振幅。

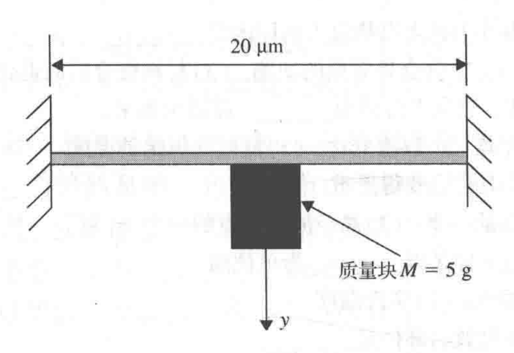


图4.54　条状的弹簧-质量块系统

5. 在上面的第4题中，当一个$F(t) = 5\cos(1910\, t)$牛顿的外力在$t > 0$时开始作用于质量块，试确定弹性硅条折断所需的时间。假定弹性硅条的挠曲形变达到1 mm时即发生折断，硅条-质量块系统是从静止状态开始振动的。
6. 假设振动梁的最大形变量为5 mm，试确定例题4.10中弹性梁的厚度。
7. 试评估阻尼效应对一个悬臂梁-质量块振动系统振幅的影响。
8. 试评估阻尼效应对例题4.12中梁-质量块振动系统运动的影响。
9. 将例题4.12中所介绍的力平衡型微加速度计应用于例题4.14所描述的情形，其中的两个梁式弹簧的尺寸与例题4.9中给出的完全相同，试确定梁-质量块的最大运动，阻尼效应可以忽略不计。
10. 例题4.17所描述的微致动器①工作时预期温度将从10℃上升到50℃。画出该致动器自由端的运动随着温度上升的变化曲线。
11. 当梁在厚度方向上的温度分布为$T(z) = 2 \times 10^6 z + 30$℃时，计算梁上由于温度变化诱生出的最大热应力、热应变和位移。梁的几何形状和尺寸如图4.45所示，其材质为硅。
12. 当梁的宽度为$b = 100$ μm时，重新求解例题4.19(提示：利用薄板的公式)。
13. 当梁的上表面在时间t分别为0.1 μs、0.5 μs和1.5 μs时受到加热的条件下，求出其上的最大热应力、应变和位移，梁的几何结构、负载情况及其他条件均如例题4.19所述，画出加热期间上述计算结果随时间的变化曲线。
14. 使用一个如图4.49(b)所示的三点弯曲样品来计算硅衬底的断裂韧度，梁式样品的尺寸如图4.55所示，$s = 1$ cm，$b = 5$ mm，$c = 100$ μm，梁的宽度为$B = 2400$ μm②，假定使梁式样品发生断裂的力为40 MN。

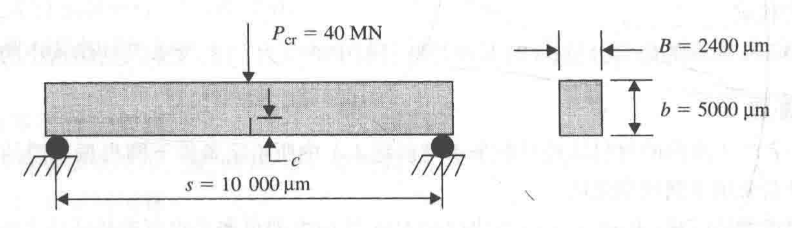


图4.55　采用三点弯曲法测量硅的断裂韧度

15. 如果上面第14题中梁的宽度B增大100倍，硅样品的断裂韧度会发生什么样的变化？通过这两种情况的对比，你能够通过观察得到什么样的结论？

---

① 原文为“微加速度计”。——译者注

② 原书此处为240 μm，但图中为“$B = 2400$ μm”。——译者注

第 5 章　热流体工程与微系统设计

5.1　引言

有许多 MEMS 器件和微系统，例如我们在第 2 章中介绍的歧管绝对压力传感器(MAPS)，人们都期望其能够处理热气体，也期望许多其他的器件能够在高温下工作。此外还有很多生物传感器中的微阀、泵和流体元件也都与液态和气态形式的运动流体有关。当电子电路与器件的尺寸不断缩小导致其功耗密度不断增大时，就要用到第 2 章中介绍的微热管来进行有效的散热，这也会涉及到两相热流体在毛细管道中的流动。这些系统的机械设计要用到流体动力学及热传导的理论与基本原理。在微制造工艺的设计中也会用到热流体工程的一些基本原理，这些我们将在第 8 章中介绍。例如，在许多薄膜淀积的工艺中就需要很好地控制热衬底表面的气体流动状态。

本章将首先回顾基于经典连续介质理论的一些热流体工程的基本原理以及如何将这些基本原理应用于 MEMS 和微系统的设计。在不久的将来，包含有大量这类高功率密度器件的 MEMS 与微系统在不断小型化的道路上不但会继续发展，而且还有进一步加速的趋势，因此科学家和工程师们也都在这个前沿研究领域进行着不懈的努力。

5.2　宏观和介观流体力学基础回顾

流体力学是研究运动中的流体(流体动力学)或者静止中的流体(流体静力学)以及固体与流体之间相互作用的学科。对于 MEMS 和微系统的设计来说，工程师们主要关注的是流体动力学。

微系统设计工程师需要处理两种主要的流体类型：(1)不可压缩的流体，例如各种液体；(2)可压缩性的流体，例如各种气体。这两种类型的流体在微/纳尺度的系统中都有广泛的应用。

流体通常是大量分子的集合体。在液体中这些分子之间的距离较小，而在气体中这些分子之间散布的距离则比较大。和固体材料不同的是，流体分子之间的距离要远大于流体分子自身的尺寸，并且这些分子也不是固定在某个晶格阵列上，而是相互之间可以自由运动。因此可以把流体看作是一种有特定体积而无特定形状的物质。另外一点与固体材料不同的是，流体无法抗拒任何剪力或者切应力而不发生移动。所有的流体都具有一定的黏性，因而在其流动过程中就会引起摩擦，黏性是对流体运动中所引起的剪切阻力的一种度量。因此必须施加一定的驱动压力才能使得流体流过各种导管、通道，或流过管道系统中的各种流体通路。

如前所述，我们可以应用连续介质的流体理论来研究宏观和介观尺度中的流体运动。所谓连续介质流体，就是指其各种性质在空间中连续变化的流体，因此我们也可以用微积分理论来分析这种连续介质流体的物理特性。

5.2.1 流体的黏性

即使是一个很微小的剪力都有可能引起流体的运动。如图5.1所示，在一块流体上作用的切应变可以采用其形变前的直角[如图5.1(a)所示]与形变后的倾角θ[如图5.1(b)所示]之间的变化来表示。倾角θ的大小反映了流体所受剪力的大小，其单位为弧度(rad)。

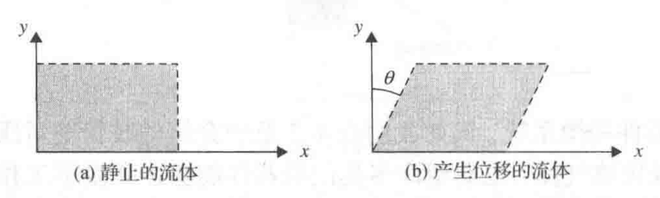


图5.1 流体的剪切形变

图5.1展示的剪切形变还可以被看作是由放置在这块流体上下表面的一对平板的相对运动所引起的，如图5.2所示。

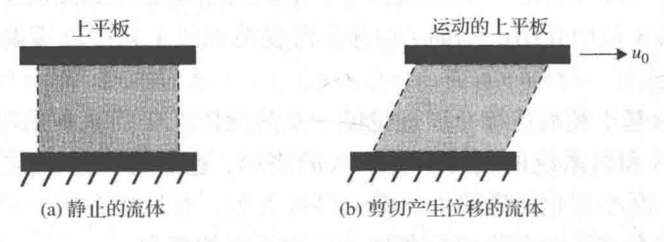


图5.2 运动平板作用下流体的剪切流动

我们注意到图5.2(b)中流体的形变是由流体上表面的平板以速度u_0运动而产生的。在这种情况下我们假设流体与上下平板的界面均满足无滑动的边界条件，上下两块平板之间相对的平行运动反映了引起流体流动的剪力，其对应的切应力τ则被认为与其引起的切应变θ的变化率成正比。上述关系在数学上可以表示为：

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t}$$

或者也可以写成以下的形式：

$$\tau = \mu\frac{\delta\theta}{\delta t}$$

在流体连续流动的情况下，切应变的变化增量可以看作无穷小，即$\delta\theta \to 0$，由此可以得到：

$$\tau = \lim_{\delta t \to 0}\left(\mu\frac{\delta\theta}{\delta t}\right) = \mu\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{5.1}$$

式中的比例常数μ称为流体的动力黏度或黏度，它是流体的一个非常重要的特性。从式(5.1)可知，切应力和切应变率之间呈现一种线性关系。具有这样一种线性关系的流体则被称为牛顿流体。有关其他流体类型的划分则定性地如图5.3所示。

图5.2所示流体的流速分布如图5.4所示，从图中可以看到流速在y方向是线性变化的。我们很容易证明式(5.1)中的$\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t$等于$\mathrm{d}u(y)/\mathrm{d}y$，其中$u(y)$代表距离底部静止平板$y$处的流体速度。因此切应力$\tau$可以进一步表示为：

$$\tau = \mu\frac{\mathrm{d}u(y)}{\mathrm{d}y} \tag{5.2}$$

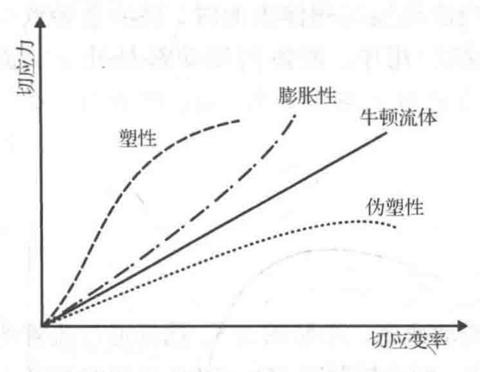


图 5.3　流体的分类(引自[White, 1994])

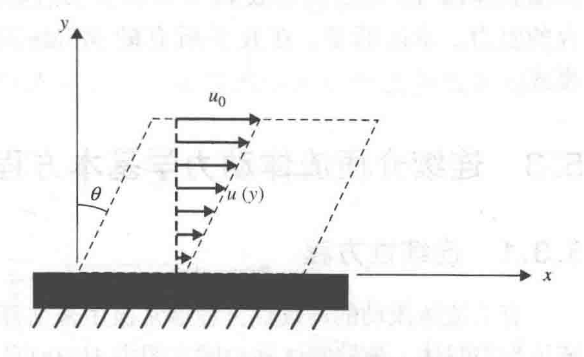


图 5.4　牛顿流体流动中的速度分布

第 4 章中的表 4.3 给出了 7 种特定流体在式(5.2)中的动力黏度数值。在流体力学分析中对于流体的黏性还经常采用另外一种度量标准，称为运动黏度 ν，它的定义为 $\nu=\mu/\rho$，其中 ρ 是流体的质量密度。

5.2.2　流线和流管

所谓流线，就是运动流体中任意一点的轨迹。流线的方向与流体中运动点的运动方向完全一致。流线具有以下的特性：

1. 流体的流动不会与流线发生交叉。
2. 任意两条流线都不会相交，除非该点处流体的速度为零。
3. 流体中的任何边界线也一定是一条流线。
4. 一般而言，在一个稳态的流动中，流线可以随时改变其位置和形状。

所谓流管，是由一束流线上的所有点组成的一个封闭曲线所构成。

5.2.3　控制体和控制面

鉴于各种流体自身都不具有固定的形状，因此不可能像固体那样来定义流体的体积，相应地我们提出控制体这个概念来用于计算流体的体积。一块流体(v)的控制体是按照这样的方式来确定的，即在流体质量穿过该控制体表面的地方，其流动的属性(例如速度)是可以估算出来的。控制体的表面则称为控制面 s。

5.2.4　流动模式和雷诺数

流体流动的模式对于工程计算的结果具有重要的影响。流体流动通常具有两种模式：(1)层状流动(层流)；(2)紊乱流动(湍流)。层流是指流体沿着流线平缓地流动，与之相反，湍流则是比较剧烈的，它的流动不遵循任何轨迹。

通常可以依据雷诺数来确定流体流动的模式，雷诺数的定义如下：

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho LV}{\mu} \tag{5.3}$$

式中，ρ、V 和 μ 分别代表流体的质量密度、速度和动力黏度；特征长度 L 是与流体流动相关的一个主要的尺度因子，例如，L 可以是管道的直径 d 或者是流体所流过平板的长度 L。

对于可压缩流体来说，当雷诺数 $\mathrm{Re}<10\sim100$ 时，流体的流动属于层流模式，对于不可

压缩流体而言，则当雷诺数 Re < 1000 时发生层流。当流体流过固体表面时，湍流会导致很大的阻力。幸运的是，在几乎所有的 MEMS 和微系统应用中，流体的流动都是处于层流模式。

5.3 连续介质流体动力学基本方程

5.3.1 连续性方程

有关流体流动的连续性方程通常被用来估算体积流动速率。参照图 5.5，选择通过流管的流体为控制体。该控制体被包围在图中 *MNPQ* 的区域中，两个控制面 *MN* 和 *PQ* 之间的距离 ds 为无穷小量，在控制面 *MN* 和 *PQ* 处流体流动的速率分别为 m 和 $m+\Delta m=m+(\partial m/\partial s)\mathrm{d}s$。我们很容易计算出：在一个很短的时间间隔 Δt 内流入控制面 *MN* 的总体积为 $m\Delta t$，而流出控制面 *PQ* 的总体积则为$[m+(\partial m/\partial s)\mathrm{d}s]\Delta t$。该控制体内的流体质量变化为$(A\,\mathrm{d}s)\Delta\rho$，其中 A 为该控制体流管的平均截面面积。根据质量守恒定律，可以得到如下关系：

$$m\,\Delta t-\left(m+\frac{\partial m}{\partial s}\mathrm{d}s\right)\Delta t=(A\,\mathrm{d}s)\,\Delta\rho$$

对于连续流动的流体来说，当 $\Delta t\to 0$ 时，可以得到 $\Delta\rho/\Delta t\to\partial\rho/\partial t$，由此可以得到关于一维流动的连续性方程为：

$$A\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial m}{\partial s}=0 \tag{5.4}$$

对于流体的稳态流动来说，$\partial\rho/\partial t=0$，根据式(5.4)可以导出$\partial m/\partial s=0$，因此可以得到稳态流动条件下的质量流速 $\dot{m}$ 为常数，即：

$$\dot{m}=\rho_1V_1A_1=\rho_2V_2A_2 \tag{5.5}$$

式中，A_1和 A_2分别是流管在 *MN* 和 *PQ* 处的截面积，通过 A_1和 A_2截面的流体流速分别为 V_1 和 V_2。

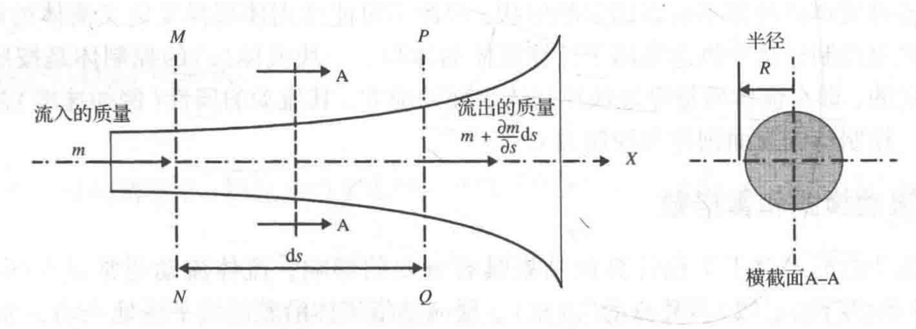


图 5.5 流管中的连续流体流动

如果流体的质量密度 ρ、流速 V 以及截面积 A 的单位分别取 $\mathrm{kg/m^3}$、m/s 和 $\mathrm{m^2}$，则式(5.5)中的质量流速 $\dot{m}$ 的单位为 kg/s。

对于不可压缩的流体而言，可以利用上面的关系式来计算流体的体积流速：

$$Q=V_1A_1=V_2A_2 \tag{5.6}$$

式中，体积流速 Q 的单位为 $\mathrm{m^3/s}$。

例题5.1　在一个微流体系统中使用的是不可压缩流体，该流体以 1 μL/min 的流速流过直径为 1 mm 的管道。采用一个节流器将上述管道与流体系统的微管道连接起来。节流器的出口直径为 20 μm。求节流器入口和出口处的流体流速，该微流体系统的示意图如图 5.6 所示。

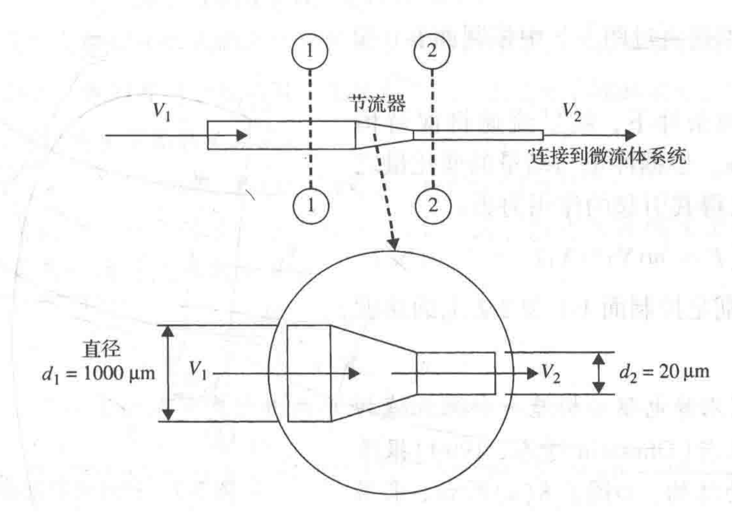


图 5.6　微流体系统的流体供给

解答：由于流体的流速较低，因此可以设想流体处于层流模式，我们还可以进一步假设流体保持一个稳定的流动状态。根据连续性方程导出的式(5.6)，图 5.6 中通过控制面 1-1 的体积流速应该等于通过控制面 2-2 的体积流速。

根据式(5.6)，可以求得体积质量流速为：

$$Q = A_2 V_2 = A_1 V_1$$

式中，$Q = 1 \times 10^{-6}\ cm^3/min = 1.67 \times 10^{-14}\ m^3/s$，节流器入口和出口的截面积分别为：

$$A_1 = \frac{1}{4}\pi(1000 \times 10^{-6})^2 = 0.785 \times 10^{-6}\ m^2$$

$$A_2 = \frac{1}{4}\pi(20 \times 10^{-6})^2 = 314 \times 10^{-12}\ m^2$$

这样就可以利用连续性方程计算出节流器入口和出口处的流体流速如下：

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{1.67 \times 10^{-14}}{0.785 \times 10^{-6}} = 0.0217\ \mu m/s$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{1.67 \times 10^{-14}}{314 \times 10^{-12}} = 53.2\ \mu m/s$$

5.3.2　动量方程

动量方程可以用来计算流体流动过程中作用在其周围固体上的力。动量方程是在动量守恒定律和牛顿动力平衡定律基础上导出的。

考虑如图 5.7 所示的二维稳态流动情况。所选择的控制体 *ABCD* 经过一个微小的运动之后到达一个新的位置，其标识为 *A′B′C′D′*。

在这个短暂的 d*t* 时间内，控制体动量的变化量为：

控制体动量的变化量	=	$A'B'C'D'$ 的动量	-	$ABCD$ 的动量
	=	$CDC'D'$ 的动量	-	$ABA'B'$ 的动量

$$= (\dot{m}_2 dt) V_2 - (\dot{m}_1 dt) V_1$$

式中，$\dot{m}_1$ 和 $\dot{m}_2$ 分别是流过图5.7中控制面1-1和2-2的质量流速。

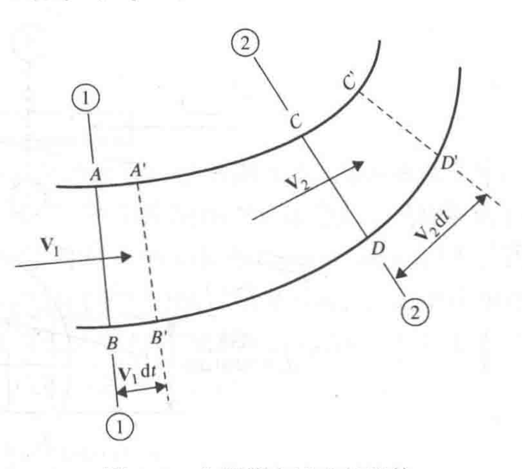


图5.7　在流管中流动的流体

在稳态流动的条件下，质量流速将保持恒定，即 $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$。根据冲量与动量的变化量之间的关系，可以求得其引起的作用力为：

$$\sum F = \dot{m}(\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1) \qquad (5.7)$$

式中，$\mathbf{V}_1$ 和 $\mathbf{V}_2$ 分别是控制面1-1和2-2上的速度矢量。

例题5.2　利用静电驱动构造一个微机械加工的硅阀。阀单元与[Ohnstein 等人，1990]报道的结果具有相似的结构，如图5.8(a)所示，采用一个尺寸为300 μm宽×400 μm长×4 μm厚的闭合薄板来作为微阀。利用静电力驱动薄板弯曲来打开或关闭微阀，从而可以调节氢气的流量。闭合薄板的最大开启位置与水平关闭位置之后呈15°角。当气体流速为60 cm/min时，其体积流速为30 000 cm^3/min，计算流体的作用力，并计算流过平板下表面质量流速的分量。

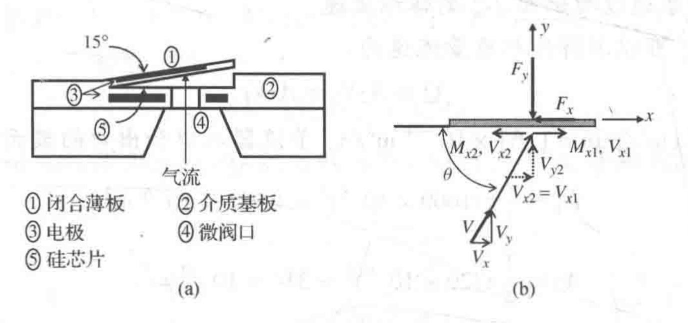


图5.8　微阀中的流体作用力：(a)微阀单元；(b)闭合平板上的流体作用力

解答：假设在最大开启的位置，气流以 $\theta = 75°$ 的入射角冲击到平板上，随后气流分离成 M_{x1} 和 M_{x2} 两个分量，其作用的速度分别为 V_{x1} 和 V_{x2}，如图5.8(b)所示。我们分别以 M_{x1} 和 M_{x2} 来表示气体质量流速 $\dot{m}$ 在两个方向上的分量。

气体的体积流速 Q 为30 000 cm^3/min，即 500×10^{-6} m^3/s。氢气的质量流速与该气体的质量密度 ρ 有关，其数值为 $\rho = 0.0826$ kg/m^3 [Janna, 1993]，因此氢气的质量流速为 $\dot{m} = \rho Q = 0.0826 \times (500 \times 10^{-6}) = 41.3 \times 10^{-6}$ kg/s。

参照图5.8(b)所示的受力分析图并依据方程(5.7)，可得到以下关于作用力的两个分量的表达式：

$$\sum F_y = \dot{m}(V_{y2} - V_y) \qquad (a)$$

$$\sum F_x = (M_{x1}V_{x1} - M_{x2}V_{x2}) - \dot{m}V_x \qquad (b)$$

式中，V_{y2} = 流体在平板表面沿着 y 轴方向的速度（在题示的情况下为 0）；V_x = 气流沿着 x 轴方向的速度分量 = $V\cos\theta$；V_y = 气流沿着 y 轴方向的速度分量 = $V\sin\theta$。

因此，将 $\theta = 75°$，$V = 60$ cm/min，即 10^{-2} m/s，代入上面的式(a)中，即可求出作用力的分量为 $F_y = 40\times10^{-8}$ kg · m/s^2 $= 40\times10^{-8}$ N。

只有在已知气体与接触平板表面之间的摩擦系数的条件下，才能够求出气体作用在平板上的水平力分量 F_x。然而，我们可以合理地假设气体在平板表面是无摩擦的流动，即 $\sum F_x = 0$，因此根据上面的式(b)可以得出下面的关系式：

$$(M_{x1}V_{x1} - M_{x2}V_{x2}) - \dot{m}V\cos\theta = 0$$

在无摩擦流动的前提下，还可以进一步假设 $V_{x1} = V_{x2} = V$，因此通过联立求解下面的方程组，可以求得平板下表面处质量流速的分量：

$$M_{x1} - M_{x2} = \dot{m}\cos\theta \tag{c}$$

$$M_{x1} + M_{x2} = \dot{m} \tag{d}$$

根据上述方程组，可以求得质量流速的两个分量分别为：

$$M_{x1} = \frac{1}{2}\dot{m}(1+\cos\theta) = \frac{1}{2}(41.3\times10^{-6})(1+\cos 75°) = 26\times10^{-6}\ \text{kg/s}$$

$$M_{x2} = \frac{1}{2}\dot{m}(1-\cos\theta) = \frac{1}{2}(41.3\times10^{-6})(1-\cos 75°) = 15.3\times10^{-6}\ \text{kg/s}$$

5.3.3　运动方程

有关流体动力学的运动方程主要用于分析估算流体的运动与所需驱动力（即压力）之间的关系。流体动力学运动方程的一个非常重要的应用就是用来确定驱动流体运动所需泵的功率。以下方程的推导都是基于这样的假设，即流体与所接触管道表面之间的摩擦力可以忽略不计。

图 5.9 给出了位于 x-y 平面上沿着流线运动的一个单位厚度（垂直于纸面方向）的二维流体单元示意图。这个微小的流体单元位于直角坐标系 (x,y) 中，其沿着定义流线的切向 (s) 和法向 (n) 方向的两条边长分别为 ds 和 dn。该流体单元的流动依靠底部（即单元的左下侧）压力 p 的作用来维持，流体重力 dw 的作用方向始终竖直向下。对所有作用在该流体单元上的切向力和法向力进行求和，并应用牛顿第二定律，即可建立所施加的压力与单元运动速度之间的关系式：$\sum F_s = ma_s$ 和 $\sum F_n = ma_n$，式中 F_s 和 F_n 分别是沿着图 5.9 所示 s 方向和 n 方向的惯性力；m 是该流体单元的质量；a_s 和 a_n 则分别是沿着 s 方向和 n 方向的加速度。根据运动粒子沿着曲线路径运动的动力学理论，这两个加速度分量与流体单元切向速度 $V(s,t)$ 之间的关系可以表示为下面两个表达式：

$$a_s = \frac{\partial V(s,t)}{\partial t} + V(s,t)\frac{\partial V(s,t)}{\partial s}$$

$$a_n = \frac{\partial V_n(s,t)}{\partial t} + \frac{V(s,t)^2}{R}$$

式中，$V_n(s,t)$ 是切向速度 $V(s,t)$ 沿着法向的分量。

因此，根据牛顿第二定律给出的上述关系，可以导出如下形式的运动方程：

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial s}\right) = -\frac{\partial P}{\partial s} - \rho g\sin\alpha \tag{5.8a}$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_n}{\partial t}+\frac{V^2}{R}\right)=-\frac{\partial P}{\partial n}-\rho g\cos\alpha \tag{5.8b}$$

方程(5.8)式称为欧拉方程。

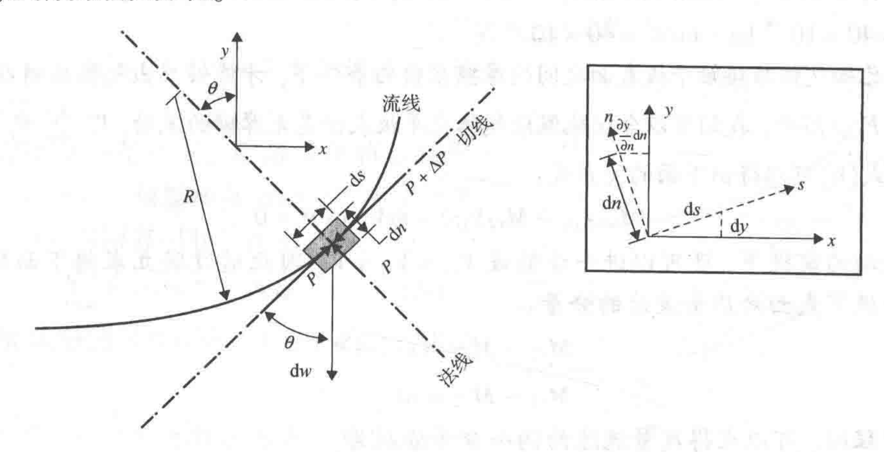


图5.9 沿着流线运动的一个流体单元

在三维直角坐标系中，当 x 轴的方向与流线方向相一致时，上述运动方程可以表示为：

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+X \tag{5.9a}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+Y \tag{5.9b}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+Z \tag{5.9c}$$

式中，u = 流体沿着 x 方向的速度 = $u(x,y,z)$；v = 流体沿着 y 方向的速度 = $v(x,y,z)$；w = 流体沿着 z 方向的速度 = $w(x,y,z)$；X、Y 和 Z = 流体的体积力(例如重力)沿着 x、y 和 z 方向的分量。

根据上述运动方程还可以进一步导出著名的伯努利方程：

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{P_1}{\rho g}+y_1=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{P_2}{\rho g}+y_2 \tag{5.10}$$

该方程描述的情形如图5.10所示。

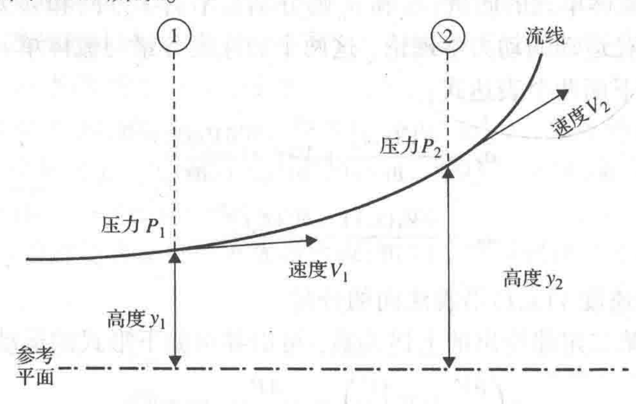


图5.10 状态属性不断变化的流体流动

例题 5.3　试求出流过长度为 10 cm 的锥形管中的微量乙醇溶液的压差，其中入口处的流速为 600 μm/s，乙醇溶液的质量密度为 789.6 kg/m³ [Avallone 和 Baumeister, 1996]。锥形管与水平面之间的倾角为 30°，如图 5.11 所示。

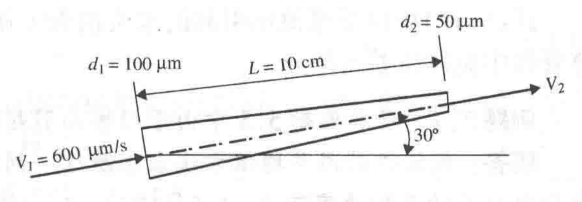


图 5.11　流体在锥形管中的流动

解答：设锥形管在入口处的截面面积为 A_1，在出口处的截面积为 A_2，通过计算可以求得，A_1和 A_2分别为 0.784×10^{-8} m²和 0.1964×10^{-8} m²。已知入口处的流速为 600 μm/s，即 600×10^{-6} m/s，因此根据式(5.6)可以确定出口处的流速为：

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2} = 2.4\times10^{-3}\ \text{m/s}$$

通过变换式(5.10)的伯努利方程，可以得到以下关于压差 ΔP 的表达式：

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \rho g\left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (y_2 - y_1)\right] \tag{5.11}$$

式(5.11)中锥形管出口处和入口处的高度差$(y_2 - y_1)$等于 $L\sin30° = 5\times10^{-2}$ m。

由此根据式(5.11)可以计算出上述压差为 387.3 N/m²，即 387 Pa。

5.4　圆形导管中的层流体流动

我们在前面的章节中推导运动方程时做了这样的假设，即流体在流过导管时与导管壁之间没有滑移。这个假设显然与我们后来所做的假设，即流体在不同流线之间以及在流体和接触的导管壁之间都没有摩擦，是互相矛盾的。事实上，在导管中流动的流体是受到摩擦力影响的。在这种情况下，摩擦因素会不可避免地引起额外的压力损失。在一个直径为 d、长度为 L 的圆形导管中，由于流体之间以及流体与接触的导管壁之间的摩擦而引起的等效水头损失可以通过下面的 Darcy-Weisbach 方程来表示[White, 1994]：

$$h_f = f\frac{L}{d}\frac{V^2}{2g} \tag{5.12}$$

式中，f 为达西(Darcy)摩擦因子，其表达式为：

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} \tag{5.13}$$

式中，τ_w是作用在导管壁上的切应力，其数值可以通过在式(5.2)中，令 $y = d/2 = a$ 来求得，此处，d 为导管的内径。我们还可以利用下面的表达式来估算出式(5.13)中 τ_w的数值：

$$\tau_w = \frac{a}{2}\left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(P + \rho g y)\right| \quad \text{对于层流情形} \tag{5.14}$$

据此达西摩擦因子还可以进一步推导为以下的简单表达式：

$$f_\ell = \frac{64}{\text{Re}} \tag{5.15}$$

式中，Re 就是由式(5.3)表示的雷诺数，只是其中的特征长度 L 采用导管的直径 d 来代替而已。

式(5.12)中由于摩擦而引起的水头损失 h_f 则包含在式(5.10)给出的伯努利方程右侧估算管线中流体压差的部分。

例题5.4 计算例题5.3中由于摩擦而引起的等效水头损失。

解答：我们将采用平均值方法来求解这个问题：导管的平均直径为 $d=75\ \mu m$，导管入口处和出口处的平均速度为 $V=1.5\times10^{-3}$ m/s。可以根据表4.3进一步查得乙醇溶液的动力黏度为 $\mu=1199.87\times10^{-6}\ N\cdot s/m^2$。

由此根据式(5.3)可以求得雷诺数为：

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho Vd}{\mu}=\frac{789.6\times(1.5\times10^{-3})\times(75\times10^{-6})}{1199.87\times10^{-6}}=0.074$$

再根据式(5.15)可以计算出摩擦因子为：

$$f=\frac{64}{\mathrm{Re}}=\frac{64}{0.074}=864.86$$

最后可以通过式(5.12)来确定等效水头损失 h_f 为：

$$h_f=(864.86)\frac{10^{-1}}{75\times10^{-6}}\frac{(1.5\times10^{-3})^2}{2\times9.81}=0.1322\ \mathrm{m}$$

图5.12给出了流体在半径为 a 的圆形导管中流动的层流示意图。采用柱坐标系统中的运动方程(5.8)和方程(5.9)，可以推导出关于体积流速 Q 和压差 ΔP 的 Hagen-Poiseuille 方程[White, 1994]：

$$Q=\frac{\pi a^4}{8\mu}\left[-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(P+\rho gy)\right] \tag{5.16}$$

式中，y 是导管相对于参考平面的高度。

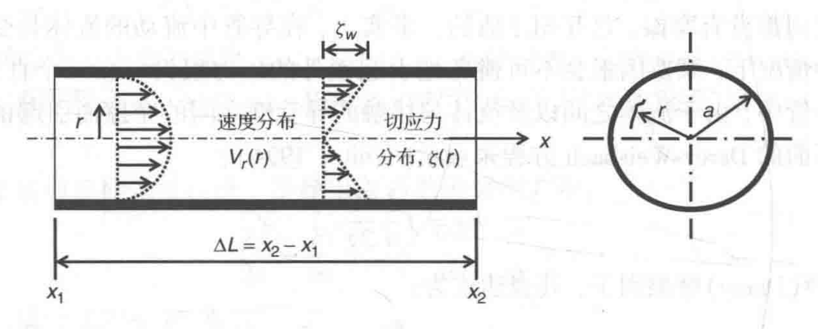


图5.12 圆形导管中的流体流动

沿着导管中长度为 L 的流体上的压降为：

$$\Delta P=\frac{8\mu LQ}{\pi a^4} \tag{5.17}$$

等效水头损失与体积流量 Q 之间的关系则为：

$$h_{f,\ell}=\frac{128\mu LQ}{\pi\rho gd^4} \tag{5.18}$$

上述表达式中参数 d 代表完全充满流体的圆形导管直径。对于部分充满流体的圆形导管截面或者截面不是圆形的导管来说，圆形导管直径 d 可以采用水力学直径 d_h 来代替。水力学直径 d_h 的定义为：

$$d_h = \frac{4A}{p} \tag{5.19}$$

式中, A 为流体的截面积; p 是湿周长, 即与流体相接触部分的周长。我们很容易求得一个宽度为 w、高度为 h 的矩形截面导管的水力学直径 d_h 为:

$$d_h = \frac{4A}{p} = \frac{4(wh)}{2(w+h)} = \frac{2wh}{w+h}$$

从式(5.17)和式(5.18)中可以观察到一个令人惊奇的现象, 即对于层流情形来说, 流体上的压降以及摩擦引起的等效水头损失均与导管直径的 4 次方成反比, 这也就意味着当导管的直径减小一半时, 驱动相同体积流量的流体则需要 16 倍的驱动功率。

5.5　计算流体动力学

流体动力学的控制方程就是著名的 Navier-Stokes 方程组, 各种现代计算流体动力学(CFD)的程序也是在其基础上建立起来的。Navier-Stokes 方程组的推导已经超出了本书的讨论范围, 有很多有关流体力学方面的书籍(例如[White, 1994])都有该方程组的推导。我们在此仅仅给出用于求解运动流体在三维空间中分别沿着 x、y 和 z 坐标轴的速度矢量 u、v 和 w 的方程组:

$$\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)u(x, y, z) = \rho\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial t} \tag{5.20a}$$

$$\rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)v(x, y, z) = \rho\frac{\partial v(x, y, z)}{\partial t} \tag{5.20b}$$

$$\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)w(x, y, z) = \rho\frac{\partial w(x, y, z)}{\partial t} \tag{5.20c}$$

式中, ρ 为流体的质量密度; g 为重力加速度; P 为驱动压力; μ 为流体的动力黏度; t 为时间。

作用在流体控制体中一个微小立方单元(如图 5.13 所示)上的各个应力分量可以通过对 Navier-Stokes 方程组中各个速度分量的微分来求得:

$$\tau_{xx} = 2\mu\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} \qquad \tau_{yy} = 2\mu\frac{\partial v(x, y, z)}{\partial y} \qquad \tau_{zz} = 2\mu\frac{\partial w(x, y, z)}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu\left(\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial x}\right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu\left(\frac{\partial w(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z}\right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu\left(\frac{\partial v(x, y, z)}{\partial z} + \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial y}\right) \end{aligned} \tag{5.21}$$

作用在一个运动流体上的全部应力分量可以表述为:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -P + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -P + \tau_{zz} \end{bmatrix} \tag{5.22}$$

目前有很多不同类型的商用 CFD 计算程序可以用来求解微系统中流体的动力学特性。

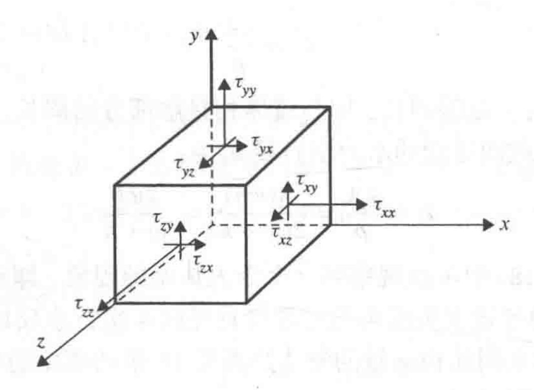


图5.13　作用在一个流体单元上的各个应力的图示

5.6　微导管中不可压缩流体的流动

在流体动力学中，一个众所周知的现象是在导管中流体流动的速度分布沿着朝向导管中心的方向逐渐增加，如图5.12所示，产生这一现象的部分原因在于导管壁的无滑移边界条件。另一个很多人观察到的普遍现象是，在一个平面上黏性流体液滴的表面是呈现球状的，进一步的观察表明，这一现象仅仅存在于很小的液滴中。这些微小液滴形成的原因是因为液滴的球状表面存在着超过流体内部静压力的张力，这个张力称为不可压缩流体的表面张力。

5.6.1　表面张力

液体的表面张力与分子之间的内聚力有关。当液体与空气或固体(如导管壁)相接触时，第3章中所描述的分子之间的作用力将使得液体表面下的分子结合在一起。另一方面，液体表面与其他介质的界面处分子之间的结合方式则与相邻接触介质中分子的结合方式有所不同。对于液体与空气接触的情形，液体表面的张力会导致液体的接触表面上凹，这一现象在很多毛细管中都可以观察到。

无滑移边界条件主要是起因于流体与导管壁之间存在的最大摩擦力。表面张力同样也存在于流体与导管壁之间的固体接触界面处，但是在常规的情况下它并不是主导的作用力。流体与导管壁之间的最大摩擦力以及流体的表面张力，二者的组合效应使得驱动流体流动所需的压力沿着导管横向截面的分布变得不均匀，这样一种非均匀分布才是众所周知的毛细管效应产生的主要原因。正如我们在第2章中所描述的许多微系统中的情形，毛细管效应可以影响微小导管中流体的动力学特性。在没有考虑流体表面张力的前提下，基于连续流体假设推导出的Navier-Stokes方程组并不适用于这些情形。对于不可压缩流体来说，连续流动与毛细管流动之间的界限目前并不是非常清楚。有关这方面的一些讨论可见参考文献[Madou, 1997]。

流体的表面张力 F_s 可以表示为：

表面张力 F_s	=	湿周长 S	×	表面张力系数 γ

表面张力系数 γ 的单位为N/m，它是反映表面张力大小的一种量度。根据参考文献[White, 1994]的报道，水的表面张力系数 γ 值可以根据下面的经验公式求得：

$$\gamma(T) = 0.076\,15 - 1.692 \times 10^{-4}T \tag{5.23}$$

式中，T 是温度，其单位是摄氏度(℃)。

表面张力对于微导管中液体的流动有非常大的影响，因为在微导管这个尺度上，流体的表面张力对于流体的流动已经起到了主要的作用，因此需要施加额外的压力才能克服流体的表面张力。下面将要给出的公式[White, 1994]可以用来估算由于表面张力而引起的额外压降。

图5.14给出了在一个圆柱形液体和一个球形液滴中由于表面张力所引起的压力变化。如图中所示，根据液体体积内压力变化和表面张力之间的平衡原理可以推导出下面的关系式。

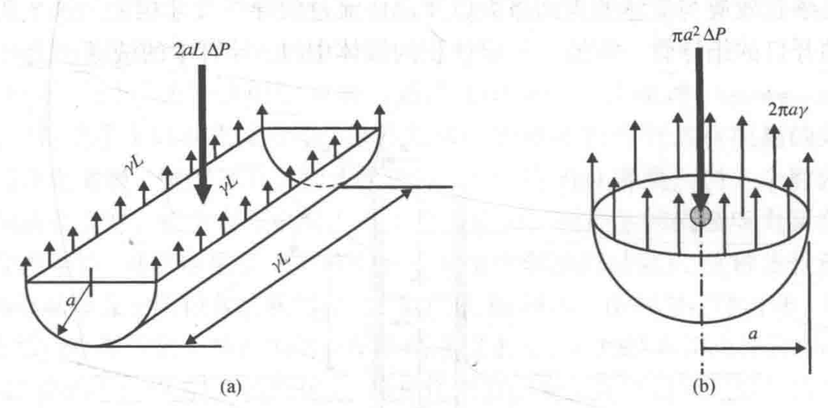


图5.14　液体中表面张力所引起的压力变化：(a)圆柱形液体；(b)球形液体

在图5.14(a)所示的圆柱形液体中，总的合力$(2aL)\Delta P$等于湿周长$(2L)$乘以表面张力系数γ，因此可以得到：

$$\Delta P = \frac{\gamma}{a} \tag{5.24a}$$

在图5.14(b)所示的球形液体中，总的合力$(\pi a^2)\Delta P$等于湿周长$(2\pi a)$乘以表面张力系数γ，因此可以得到：

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{a} \tag{5.24b}$$

因此对于如图5.15所示的直径$d \approx 2a$的微小导管中孤立液体来说，可以估算出其总的压力变化等于式(5.24a)与式(5.24b)的压力变化之和：

$$\Delta P = \frac{3\gamma}{a}$$

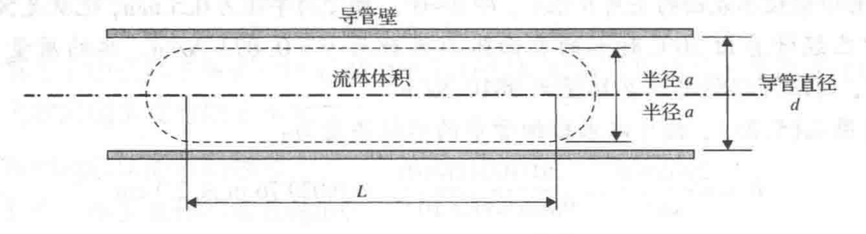


图5.15　微小导管中的流体体积

例题5.5　对于一个内径为0.5 mm的微小导管来说，试求出克服其中水的表面张力所需的压力，假设水温为20℃。

解答：首先根据式(5.23)求出20℃时水的表面张力系数为$\gamma = 0.073$ N/m。导管的半径为$a = 250\ \mu m = 250 \times 10^{-6}$ m，再依据式(5.24a)和式(5.24b)，可以求得克服表面张力所需的压力为：

$$\Delta P = \frac{3\gamma}{a} = \frac{3 \times 0.073}{250 \times 10^{-6}} = 876\ \text{N/m}^2 \text{ 或 } 876\ \text{Pa}$$

5.6.2 毛细管效应

流体的毛细管效应与流体的表面张力以及流体流过的导管尺寸相关。一个明显的毛细管效应是将两端开口的细导管一端插入一定体积的液体中时，导管中的液面会上升，如图5.16所示。

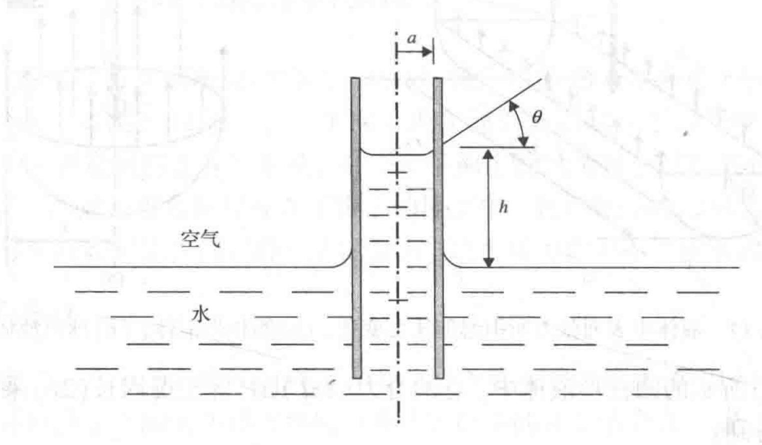


图5.16　细导管中流体的毛细管效应

流体在细管中上升的毛细高度可以通过下面的公式来计算[White, 1994]：

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{wa} \tag{5.25}$$

式中，$w = \rho g$是流体的比重；θ是自由流体表面边缘与毛细管壁之间的夹角；a是毛细管的半径。

图5.16所示的液体在毛细管中会上升一定高度h的现象，是毛细管效应引起的驱动压力导致的结果。正如2.6.3节中所述，在微型热管中这个驱动压力也驱使冷凝的液体沿着管道尖角处的毛细管进行回流。

例题5.6　如图5.16所示，试求出图中细管内水柱上升的高度h，细管的直径为1 mm。

解答：可以假设水表面的夹角θ很小，即$\theta \approx 0°$。细管的半径为0.5 mm，也就是500×10^{-6} m。例题5.5中已经计算出20℃时水的表面张力系数为$\gamma = 0.073$ N/m。水的质量密度为$\rho = 1000$ kg/m³，因此可以计算出其比重为9810 N/m³。

由此利用式(5.25)，就可以求出细管中的水柱高度为：

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{wa} = \frac{2(0.073)\cos(0)}{9810(500 \times 10^{-6})} = 0.029\ 76\ \text{m 或 } 2.9\ \text{cm}$$

该水柱引起的静态压力为：

$$P = \rho g h = (1000\ \text{kg/m}^3)(9.81\ \text{m/s}^2)(0.029\ 76\ \text{m}) = 292\ \text{N/m}^2 \text{ 或 } 292\ \text{Pa}$$

5.6.3 微型泵

从式(5.17)中看到，利用压力泵驱动液体通过微细导管存在着一个严重的物理局限性，即在圆形导管中驱使液体流动的压降 ΔP 与圆形导管的半径 a 或者直径 d 的 4 次方成反比。因此，当导管的直径减小一半时，所需压力泵的功率将增大16 倍。更为严重的是，根据式(5.24)，当液体在微细导管中流动时，表面张力的影响也会变得更加显著。因此，从工程应用的角度来说，采用常规压力泵的方法来驱动微细导管中液体的体积流动是不可行的。

目前也有很多种方法可以在微米尺度的导管中实现对各种液体的有效驱动[Madou, 1997]。第 3 章中介绍的基于电渗透和电泳原理的电液动力学致动泵是目前工业界普遍采用的实用方法。下面讨论的是另外一种可行的微型泵技术，即压电泵技术，它利用表面力代替容积压力来驱动液体在微细导管中流动。

图 5.17 展示了用于微导管中驱动微流动的压电泵的工作原理[Nyborg, 1965; Madou, 1997]。导管的管壁通常只有几微米厚，这种较薄的管壁使得导管具有很高的柔性，导管外壁涂敷了一层压电薄膜，例如带有叉指式换能器(IDT)的 ZnO 薄膜。当一个射频电压施加到一个叉指式换能器上时，就会在压电层上产生机械应力。所产生的机械应力又会在导管壁薄膜上形成柔性声学波(可以参见 2.2.1 节中有关产生声学波的讨论)，这种导管壁的波动将产生泵效应从而驱动导管中所包含的液体流动，如图 5.18 所示。由物理定律可知，导管壁表面形成的力与压电效应在导管壁上所产生的声学波幅度成正比，并且沿着朝向导管中心的方向按照指数规律衰减(参见图 5.17 中 F 的变化)。这种作用力的变化规律将导致导管内流体的流速更加均匀(参见图 5.17 中 V 的变化)，这与图 5.12 所示的体积流体流动情形是截然不同的。

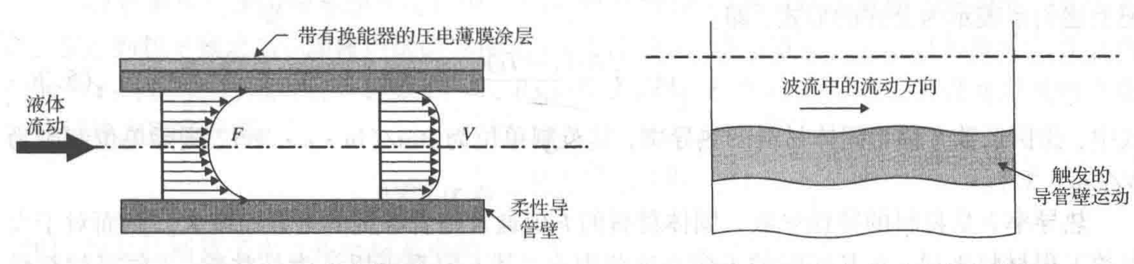


图 5.17　用于微流动的毛细管　　　图 5.18　毛细管波流中的微流动

Moroney 等人采用上面介绍的压电泵驱动声学波流的方法，在施加 5 V 射频驱动电压的情况下可以驱使空气以 30 mm/s 的速度或者水以 0.3 mm/s 的速度流动，详细情况可以参见文献[Moroney 等人, 1990, 1991]。

5.7 固体中的热传导概述

我们在第 2 章中已经了解到，许多 MEMS 器件都是采用热驱动的。涉及到这些致动器设计中的一些关键问题主要有以下 4 类：

1. 产生预期动作所需要的热量；
2. 启动和终止相关动作所需要的时间；
3. 器件中引起的相关热应力或形变；
4. 由于加热对于器件中的精密部件可能引起的损伤。

对于宏观尺度的器件来说，由于工程师们可以利用已经建立起来的各种现成的理论和公式来处理这些问题，因此这些问题基本上不是什么大的难题。然而对于亚微米和纳米尺度而言，情况却有很大的不同，大多数在宏观尺度下推导出的理论和公式都需要进行重大的修改，因为在这些尺度下固体热传输的机理与宏观情况有着根本的不同。和讨论流体力学的那一节内容相同，我们首先回顾宏观尺度下相关的热传输理论和公式，其中的某些理论和公式也可以用来解决上面提到的4类与微器件设计及制造相关的问题。在第12章中我们将对上述理论及公式在亚微米和纳米尺度上的应用给出必要的修正。

5.7.1　热传导的一般性原理

首先来分析一下图5.19所示的一个固体平板上的热传导情况。图中固体平板左侧壁的温度保持在 T_a，其右侧壁的温度保持在 T_b，且 $T_a > T_b$。平板两侧的温度差导致热量由左侧壁流向右侧壁。我们很容易理解，流过平板的总热量 Q 与平板的横截面积 A、平板左右两侧的温度差以及热量流过的时间 t 均成正比，而与热量流过的距离，即平板的厚度 d 成反比。在数学上，可以把上述定性的关系表示为：

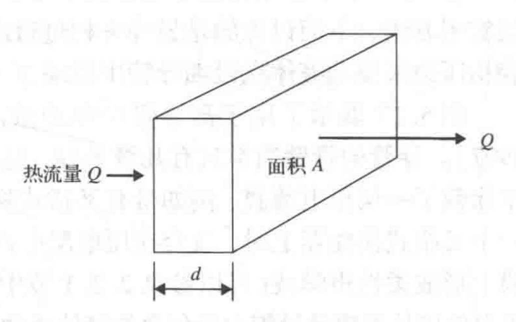


图5.19　固体平板中的热传导现象

$$Q \propto \frac{A(T_a - T_b)t}{d}$$

把上述关系表示为公式的形式，即：

$$Q = k\frac{A(T_a - T_b)t}{d} \tag{5.26}$$

式中，比例系数 k 称为固体材料的热导率，其英制单位为Btu/(in·s·℉)，国际单位制则为W/(m·℃)。

热导率 k 是材料的特性参数。固体材料的 k 值通常随着温度的上升而增大。然而对于大多数工程材料来说，在其实际的工作温度范围内，其 k 值都可以认为是常数。k 值是材料受到加热时热传导特性的量度，因此金、银、铜、铝都具有相同数量级的热传导能力。这些材料比许多其他材料具有更高的 k 值，它们也是比各类陶瓷(例如 SiC、SiO_2、Al_2O_3)更好的热传导材料。

5.7.2　热传导的傅里叶定律

式(5.26)给我们提供了一个计算平板中总的热流量的方法。在热传导分析中，一个更为实用的计算参量是热通量 q，其定义为单位时间内流过单位面积的热流量。因此根据式(5.26)，可以将流过平板的热通量表示为：

$$q = \frac{Q}{At} = k\frac{T_a - T_b}{d} \tag{5.27}$$

如图5.20所示，热通量是一个矢量，它可以通过关于热传导的傅里叶定律，与温度梯度之间建立如下的联系：参见图5.20，在空间中位于坐标 $\mathbf{r}$：(x,y,z) 位置处的一个固体材料上的热通量可以表示为：

$$q(\mathbf{r},t) = -k\ \nabla T(\mathbf{r},t) \tag{5.28}$$

式中的负号表明热通量矢量 $q(\mathbf{r}, t)$ 是沿着固体表面的外法线方向。根据式(5.26)和式(5.27)，可以确定热通量的单位为 W/m^2 或 $J/(m^2 \cdot s)$ 或 $N/(m \cdot s)$。

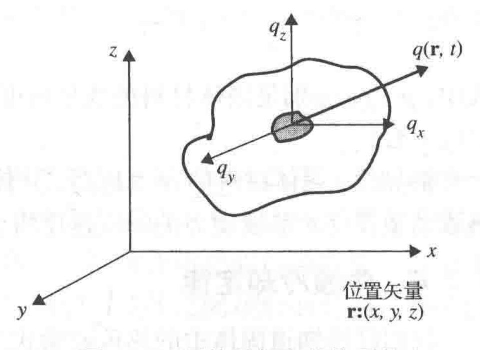


图 5.20　固体材料中的热通量

式(5.28)是热传导傅里叶定律的数学表达式。在直角坐标系中对上面的方程式进行扩展，可以得到下述关于固体中热通量的表达式：

$$q(x,y,z,t) = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \tag{5.29}$$

式中，

$$q_x = -k_x \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} \tag{5.30a}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \tag{5.30b}$$

$$q_z = -k_z \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} \tag{5.30c}$$

其中，q_x、q_y、q_z 分别是热通量矢量沿着 x、y、z 方向的分量，如图 5.20 所示；k_x、k_y、k_z 则分别是固体材料沿着 x、y、z 方向的热导率。对于各向同性材料来说，则有 $k_x = k_y = k_z$。

5.7.3　热传导方程

当有热量从热源传导至固体材料中，或者固体材料作为热沉将热量耗散到周围的介质中时，在达到热平衡之后，固体内部的温度场(即温度分布)将会遵循一定的自然规律。在直角坐标系 $\mathbf{r}$：(x, y, z) 或者柱坐标系 $\mathbf{r}$：(r, θ, z) 中的温度场 $T(\mathbf{r}, t)$ 分布，可以通过求解下面的热传导方程来获得：

$$\nabla^2 T(\mathbf{r},t) + \frac{Q(\mathbf{r},t)}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial t} \tag{5.31}$$

式中，拉普拉斯算子在直角坐标系中的定义为：

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

拉普拉斯算子在柱坐标系中的定义则为：

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

方程(5.31)中的 $Q(\mathbf{r}, t)$ 是单位体积的材料在单位时间内产生的热量。微系统中常见的热源为加热电阻，即电流通过铜膜或铝膜等电阻性的导体进行加热。电阻加热产生的热量可以通过以下的关系式进行估算：

功率 P(单位为 W)	=	电流 i(单位为 A)的平方 ^{2}	×	电阻 R(单位为 Ω)

上述表达式中的功率单位为瓦特(W)，等同于 1 J/s，在国际单位制中也等效为 1 N · m/s。

式(5.31)中的常数 α 称为材料的热扩散率，其单位为 m^2/s，它具有很重要的物理意义，可以看作是反映固体材料导热快慢的一个量度。从数学上可以推导出：

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \tag{5.32}$$

式中，ρ 和 c 分别是固体材料的质量密度和比热容，其中 ρ 的单位是 g/cm^3，而 c 的单位则是 J/(g·℃)。

很显然，固体材料的 α 值越高，其传导热的速度也就越快。因此，由高 α 值材料制成的热致动微器件对热致动力的响应速度将会高于由低 α 值材料制成的热致动微器件。

5.7.4　牛顿冷却定律

我们已经知道固体中的热传输模式主要是传导，并且由式(5.28)所给出的关于热传导的傅里叶定律就可以用来描述热传导过程。而流体中的热传输过程则与固体中有很大的差别，流体中热传输的模式主要是对流。牛顿冷却定律是用来分析流体中对流热传输现象的基础。

对于如图5.21所示的流体，其中温度为 T_a 和 T_b 的任意两点之间的热通量正比于这两点之间的温度差，即 $q \propto (T_a - T_b)$，据此可以将牛顿冷却定律表述为下面的表达式：

$$q = h(T_a - T_b) \tag{5.33}$$

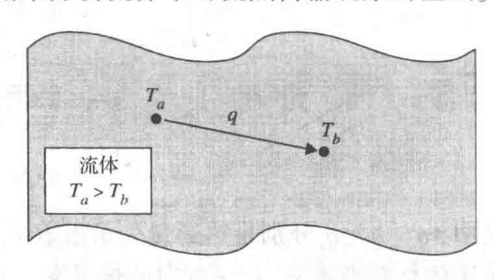


图5.21　流体中的热通量

式(5.33)中的常数 h 有几个不同的名称，在本书的分析中，我们将称其为热传输系数。

h 的数值可以通过量纲分析得出，其中的分析参数可以由实验确定。它通常体现在努塞尔(Nusselt)数中，$Nu = hL/k$，其中 L 为特征长度，k 是流体的热导率。利用下面的关系式通常可以确定努塞尔数的具体数值。

对于强迫对流，有：

$$(Nu) = \alpha(\mathrm{Re})^{\beta}(\mathrm{Pr})^{\gamma}$$

对于低速的自由对流，则有：

$$(Nu) = \alpha(\mathrm{Re})^{\beta}(\mathrm{Pr})^{\gamma}(\mathrm{Gr})^{\delta}$$

式中的参数 α、β、γ 和 δ 可以由实验来确定；Re 为雷诺(Reynolds)数；Pr 为普朗特(Prandtl)数；Gr 为 Grashoff 数。在上述这些参数中，雷诺数对 h 的数值具有决定性的影响。在式(5.3)中我们曾经给过雷诺数的定义：

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho L V}{\mu}$$

式中，ρ 和 μ 分别是流体的质量密度和动力黏度；V 则是流体流动的速度。

普朗特数和 Grashoff 数的定义分别如下：

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \tag{5.34a}$$

$$\mathrm{Gr} = \frac{L^3 \rho^2 g}{\mu^2 (\beta\, \Delta t)} \tag{5.34b}$$

式中，C_p 为流体在恒定压力下的比热容；β 是流体的体积热膨胀系数；Δt 为时间；g 则是重力加速度。

Grashoff 数通常用于分析自由对流或自然对流现象。

对于大多数的对流热传输现象，h 的数值与流体的速度有关，即 $h \propto V^{\phi}$，其中 ϕ 是一个由实验决定的常数。

5.7.5　固体–流体之间的相互作用

正如第 2 章中所述，许多热致动的 MEMS 器件都涉及到从固体部件向其周围所接触的流体上传输热量，或者反向传输热量。我们通过第 8 章中将要介绍的化学气相沉积等几个微制造工艺还会了解到，当气流流过固体衬底的表面时，会出现两种介质之间的热传输。由于固体中的热传输不同于流体中的热传输，因此有必要研究固体与流体之间接触面处两种热传输模式是如何相互作用的。

我们来看图 5.22 所示的情形，热量从温度场分布为 $T(\mathbf{r}, t)$ 的固体上耗散到周围温度为 T_f 的流体中。当然，也有可能是相反的热传输过程。

首先来仔细分析固体与流体之间的界面，我们注意到在靠近固体表面的流体中存在着一个边界层，该边界层的厚度取决于流体流过固体表面的速度以及流体的特性。这个边界层给固体和流体之间自由的热传输形成了一定的阻碍，由此产生了一个热阻。因为存在这个热阻，固体的表面温度并不等于周围流体的温度 T_f。这个热阻在数值上等于 $1/h$，其中 h 是流体的热传输系数。

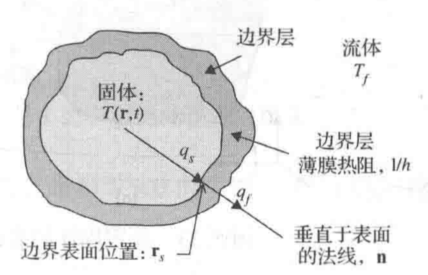


图 5.22　固体与流体之间的热流

如图 5.22 所示，从固体一侧进入边界层的热通量矢量 q_s 与离开边界层进入到流体中的热通量 q_f 必须相等，由此可以得到界面处满足下面的关系式：

$$-k \left.\frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial \mathbf{n}}\right|_{\mathbf{r}_s} = h[T(\mathbf{r}, t) - T_f] \tag{5.35}$$

式中，矢量 $\mathbf{n}$ 是固体与流体之间特定边界任意某点的法向矢量。

5.7.6　边界条件

可以采用方程(5.31)来求解 MEMS 器件中某个部件上的温度分布 $T(\mathbf{r}, t)$。利用这个温度分布又可以判断出该部件上温度最高点的位置及其最大温度值，还可以确定 4.4.3 节中所显示的相关热应力。最高温度值以及温度引起的热应力和热应变是这些部件设计中必须考虑的主要设计要点。因此甄别部件中最高温度点的位置及其温度数值是设计与热效应相关的微系统的一个重要步骤。

求解方程(5.31)需要合适的边界条件。在热分析中可以采用下面 3 种类型的边界条件。

1. **给定表面温度**：这种类型的边界条件主要适用于固体表面特定位置处的温度已知的情形。参见图 5.23(a)，$\mathbf{r}_s$ 位置处的边界条件可以表示为：

$$T(\mathbf{r}, t)\big|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s} = f(\mathbf{r}_s, t) = F(t) \tag{5.36}$$

当然，式(5.36)中的函数 $F(t)$ 在特定情况下也可能是常数。

2. **给定边界处的热通量**：图 5.23(b)展示了一个具体的情形，图中在边界 $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s$ 处流入或流出的热通量是给定的数值。正如在式(5.28)和式(5.30)中所看到的那样，固体中的热通量可以采用热传导的傅里叶定律来描述。因此通过假设线 $n-n$ 为热通量进入

或者离开表面的外法线，可以利用q_{in}或q_{out}将相应的边界条件表示如下：

$$q_{in} = +k\left.\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{n}}\right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s} \tag{5.37a}$$

或

$$q_{out} = -k\left.\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{n}}\right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s} \tag{5.37b}$$

式(5.37)中热通量前面的正负号反映了沿着外法线指向表面的方向为热通量的正方向。表5.1将帮助读者确定上述等式中正确的温度梯度符号。

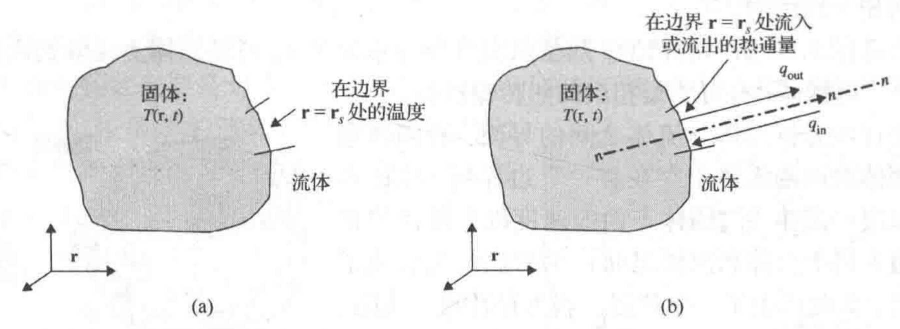


图5.23　给定固体的表面温度或热通量：(a)给定温度；(b)给定热通量

表5.1　规定的热通量边界条件的符号

外法线 n 的符号	q 与 n 的方向相同吗？	式(5.37)中 q 的符号
+	是	−
+	否	+
−	是	+
−	否	−

例题5.7　确定如图5.24所示的一个长方形物体4个侧面的热通量边界条件。该物体在x-y平面内的热传输形成的温度分布为$T(x, y)$。穿过4个侧面的热通量q_1、q_2、q_3和q_4的方向如图所示。

解答：利用方程(5.37)和表5.1，可以得出如下的边界条件：

在左侧面，外法线方向是负的，热通量方向与外法线方向相反，这与表5.1中的最后一种情况相同，即方程(5.37)中的符号为负号：

$$\left.\frac{\partial T(x,y)}{\partial x}\right|_{x=a} = -\frac{q_1}{k} \tag{a}$$

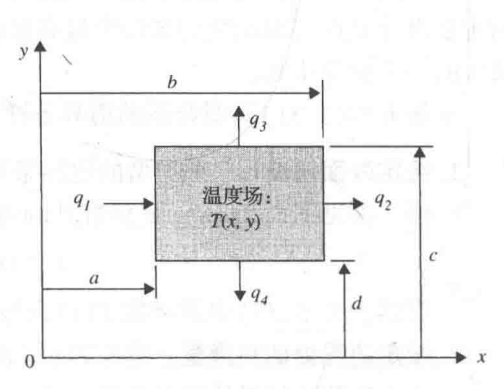


图5.24　穿过长方体4个表面的热通量

在右侧面，外法线方向是正的，热通量方向与外法线方向相同，这与表5.1中的第一种情况相同，此处的边界条件可以表示为：

$$\left.\frac{\partial T(x,y)}{\partial x}\right|_{x=b} = -\frac{q_2}{k} \tag{b}$$

在上表面，情况与右侧面类似，此处的边界条件可以表示为：

$$\left.\frac{\partial T(x,y)}{\partial y}\right|_{y=c} = -\frac{q_3}{k} \tag{c}$$

在下表面，外法线方向是负的，热通量方向与外法线方向相同，这与表 5.1 中的第三种情况相同，此处的边界条件可以表示为：

$$\left.\frac{\partial T(x,y)}{\partial y}\right|_{y=d}=+\frac{q_4}{k} \tag{d}$$

在上面的式(a)、(b)、(c)和(d)中，k 是固体材料的热导率。

3. **对流边界条件**：这种类型的边界条件适用于固体边界与温度为 T_f 的流体相接触的情形，如图 5.25 所示。通过重新整理方程(5.35)，可以得到这种情况下的边界条件为：

$$\left.\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{n}}\right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s}+\frac{h}{k}T(\mathbf{r},t)|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s}=\frac{h}{k}T_f \tag{5.38}$$

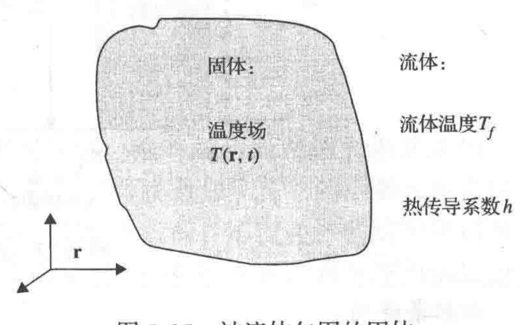


图 5.25　被流体包围的固体

从上式中可以看到，当 $h\to\infty$ 时，这种情形与式(5.36)所给定的表面边界条件是完全等价的，而当 $h=0$ 时，则得到所谓的绝热边界条件，这对应于式(5.37)中的：

$$\left.\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{n}}\right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s}=0$$

例题 5.8　写出如图 5.26 所示的热致动微梁的微分方程及合理的初始条件与边界条件。一片薄铜膜粘贴在硅梁的上表面作为加热电阻，该致动器的初始温度为 20℃。考虑与梁下表面接触的空气处于以下两种情况：(1)静止的空气；(2)空气的平均温度为 20℃，且其热传输系数为 10^{-4} W/(m^2·℃)。

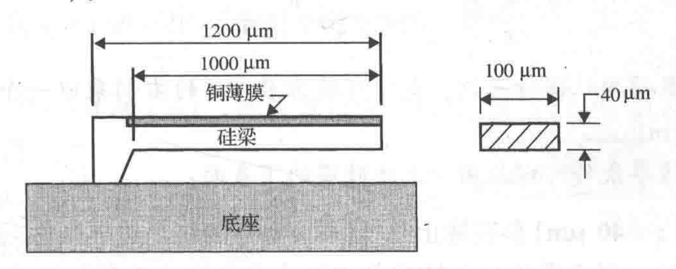


图 5.26　热致动的梁

解答：考虑到硅梁上形成的温度场主要随着梁的厚度而发生变化，因此可以合理地假设梁的温度函数为 $T(x,t)$，其中 x 是沿着厚度方向的坐标，如图 5.27 所示。

根据方程(5.31)的一般形式，可以得出本题的微分方程为：

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \tag{5.39}$$

方程(5.39)中的 α 是硅梁的热扩散率，它可以从第 7 章表 7.3 所列出的不同材料的热物理特性中求得，其中热导率 $k=1.57$ W/(cm·℃)，质量密度 $\rho=2.3$ g/cm^3，比热容 $c=0.7$ J/(g·℃)，由此可求得 $\alpha=0.9752$ cm^2/s。

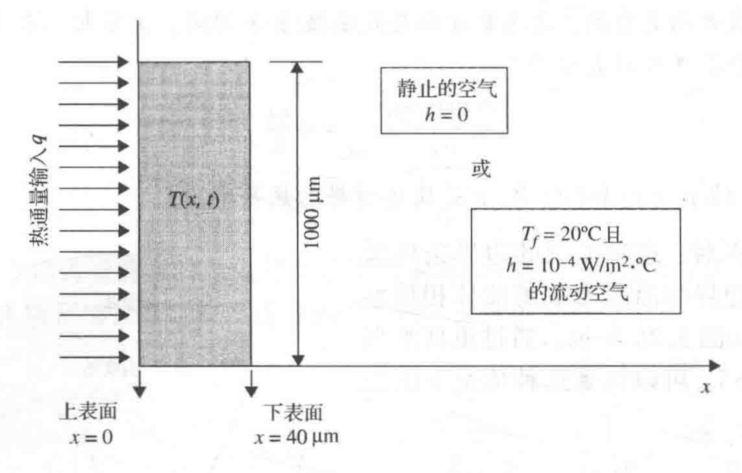


图 5.27 硅梁上的热传导

初始条件为：

$$T(x,t)|_{t=0}=20^{\circ}\mathrm{C} \tag{a}$$

对于上表面处的边界条件，当 $x=0$ 时，我们有热通量的输入条件为：

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}=-\frac{q}{k}$$

式中，q 是铜薄膜产生的热通量，k 是硅梁的热导率。

铜薄膜产生的热通量数值为 $q=i^2R/A$，其中 i 是流过铜薄膜的电流(以安培为单位)；R 是铜薄膜的电阻(以欧姆为单位)。硅梁上表面的面积为 $A=1000\ \mu\mathrm{m}\times100\ \mu\mathrm{m}=10^{-3}\ \mathrm{cm}^2$。对于目前这种情况，上面的边界条件就可以进一步表示为：

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}=-\frac{i^2R}{1.57\times10^{-3}}\qquad {}^{\circ}\mathrm{C/cm} \tag{b}$$

为了与其他参数的单位保持一致，我们可将方程(b)的右侧乘以一个变换因子(10^{-2})，将其单位变换为℃/m。

有两个可能的边界条件可以应用于上述硅梁的下表面：

1. **硅梁下表面($x=40$ μm)存在静止空气(即 $h=0$)的绝热边界条件**：这种边界条件使得方程(5.39)的求解变得相对比较容易。但是这个结论只有在假设硅梁下表面处所包裹的空气温度不发生改变的条件下才是正确的。因此在所包裹的空气产生较大的温升之前，使用这种边界条件求得的温度解 $T(x,t)$ 适用于描述加热过程刚开始的早期阶段。数学上可以将这种边界条件表述为以下形式：

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=40\times10^{-6}\ \mathrm{m}}=0 \tag{c}$$

2. **硅梁下表面($x=40$ μm)存在对流的边界条件**：这种类型的边界条件可以根据方程(5.38)从数学上表述为：

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=40\times10^{-6}\ \mathrm{m}}+\frac{10^{-4}}{157}T(x,t)|_{x=40\times10^{-6}\ \mathrm{m}}=\frac{10^{-4}}{157}\times20 \tag{d}$$

需要提请读者注意的是，为了保持各个物理量单位的一致性，式(d)中的 k 值取为 $k=157\ \mathrm{W/(m\cdot ℃)}$。

通过求解方程(5.39)并利用初始条件及边界条件(a)、(b)、(c)或(a)、(b)、(d)，可以获得硅梁上的温度场分布 $T(x, t)$。有很多种不同的方法可以用来求解方程(5.39)，例如采用分离变量法或积分变换法[Ozisik, 1968]。也有多种数值求解上述温度场分布的方法。

5.8 多层薄膜中的热传导

许多 MEMS 结构是由多层不同材料的薄膜所组成的。这些结构经常用于表面微加工制造的器件中，我们将在第 8 章和第 9 章中对此进行描述。薄膜通常呈现三明治形式的夹层结构，而且就像在致动器和微阀中那样，往往要承受一定的热载荷。不仅在评估结构对热载荷的灵敏度时需要进行热传导分析，而且正如第 4 章中所述，分析输入条件对热应力的影响也需要进行热传导分析。

有关多层介质完整的热传导分析需要非常复杂的数学推导，而且也超出了本书的范围。我们在下面给出的是一个简单的一维分析公式，并且假设该结构中各层之间界面处的热接触非常完美。该公式的详细推导过程可以参考几本论述热传导的书籍，例如[Ozisik, 1968]。

如图 5.28 所示，第 i 层结构的温度 $T_i(x, t)$ 可以通过求解下面的方程组得到：

$$\frac{\partial^2 T_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i}\frac{\partial T_i(x,t)}{\partial t} \tag{5.40}$$

式中，各层的标号分别为 $i=1, 2, 3, \cdots$，且 $x_i \leqslant x \leqslant x_{i+1}$ 和 $t>0$，并满足下面的条件：

1. 当 $t=0$ 时，在 $x_i \leqslant x \leqslant x_{i+1}$ 的位置处满足指定的初始条件；
2. 当 $t>0$ 时，在 $x=0$ 和 $x=x_{i+1}$ 的位置处满足指定的边界条件。

在图 5.28 和式(5.40)中，k_i 和 α_i ($i=1, 2, 3, \cdots$) 分别代表第 i 层材料的热导率和热扩散率。

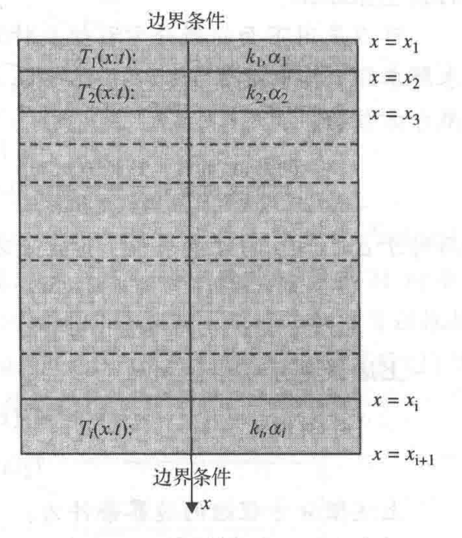


图 5.28 多层结构中的温度分布

适用于此问题的其他条件还包括界面处温度和热通量的连续性，即：

$$T_i(x_{i+1}, t) = T_{i+1}(x_{i+1}, t), \qquad i=1,2,3,\cdots$$

$$k_i\frac{\partial T_i(x_{i+1}, t)}{\partial x} = k_{i+1}\frac{\partial T_{i+1}(x_{i+1}, t)}{\partial x}, \qquad i=1,2,3,\cdots$$

例题5.9 如图 5.29 所示，一个热致动器的结构是由硅和 SiO_2 的组合悬臂梁构成的。一块铜薄膜沉积在 SiO_2 的顶层作为电阻加热器，该加热器在 SiO_2 上表面形成的最高温度为 50℃。求硅梁达到输入的表面温度 50℃ 所需要的时间。考虑到热流主要通过复合梁的厚度进行传导，因为该路径最短，因此对该问题进行沿着厚度方向的一维热传导分析是完全合理的。

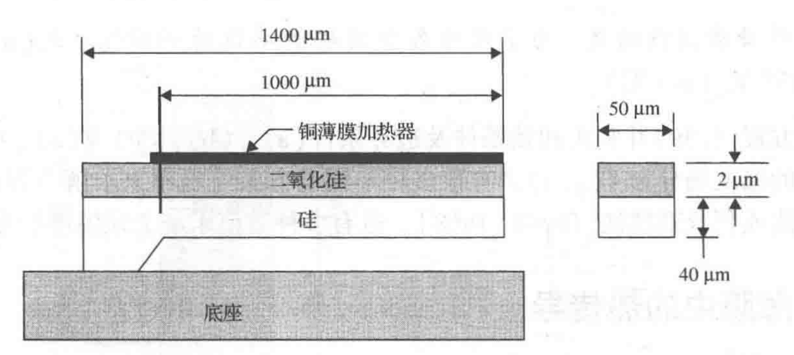


图 5.29 由复合梁组成的热致动器

给定的材料特性为(可以参见表 7.3)：

热导率：对于 SiO_2，$k_1 = 1.4$ W/(m · ℃)；对于硅，$k_2 = 157$ W/(m · ℃)。

热扩散率：对于 SiO_2，$\alpha_1 = 0.62 \times 10^{-6}$ m²/s；对于硅，$\alpha_2 = 97.52 \times 10^{-6}$ m²/s。

解答： 我们假定 SiO_2 层和硅层的温度分布分别为 $T_1(x, t)$ 和 $T_2(x, t)$，它们都可以利用与图 5.28 相类似的结构通过求解方程(5.40)得到。对于该具体问题可以利用图 5.30 所示的模型来求解。

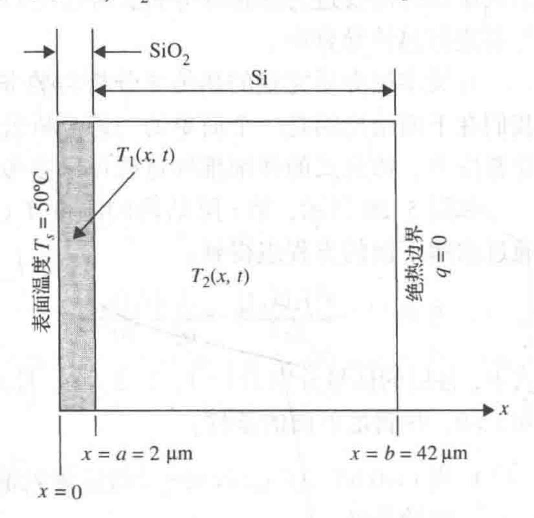


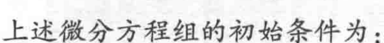
图 5.30 通过双层复合梁的热传导

可以采用下面的微分方程组及特定的条件来求解本题，其中对于 $0 \leqslant x \leqslant a$ 的 SiO_2 层来说，其微分方程为：

$$\frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1}\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} \tag{5.41a}$$

而对于 $a \leqslant x \leqslant b$ 的硅梁来说，其微分方程为：

$$\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_2}\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} \tag{5.41b}$$



上述微分方程组的初始条件为：

$$T_1(x,t)|_{t=0} = F_1(x) = 20^\circ\text{C} \tag{5.42a}$$

$$T_2(x,t)|_{t=0} = F_2(x) = 20^\circ\text{C} \tag{5.42b}$$

上述微分方程组的边界条件为：

$$T_1(x,t)|_{x=0} = 50^\circ\text{C} \tag{5.42c}$$

$$\left.\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x}\right|_{x=b=42\ \mu\text{m}} = 0 \tag{5.42d}$$

两种材料界面处的相容性条件为：

$$T_1(x,t)|_{x=a=2\ \mu\text{m}} = T_2(x,t)|_{x=a=2\ \mu\text{m}} \tag{5.42e}$$

$$k_1\left.\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x}\right|_{x=a=2\ \mu\text{m}} = k_2\left.\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x}\right|_{x=a=2\ \mu\text{m}} \tag{5.42f}$$

根据式(5.42)给定的条件，有多种方法可以用来求解方程(5.41)，从而获得双层复合梁上的温度分布函数 $T_1(x, t)$ 和 $T_2(x, t)$。下面给出的温度分布函数是采用 Ozisik 提出的积分变换法获得的[Ozisik, 1968]：

$$T_i(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{-\beta_n^2 t}}{N_n}\Psi_{in}(x)\left[\frac{k_1}{\alpha_1}\int_0^a \Psi_{1n}(x)F_1(x)\,dx+\frac{k_2}{\alpha_2}\int_a^b \Psi_{2n}(x)\,dx\right],\quad i=1,2 \tag{5.43}$$

式中，函数 $F_1(x)$和 $F_2(x)$分别是 SiO_2和硅中温度分布函数的初始条件，范数 N_n则定义为：

$$N_n=\frac{k_1}{\alpha_1}\int_0^a \Psi_{1n}^2(x)\,dx+\frac{k_2}{\alpha_2}\int_a^b \Psi_{2n}^2(x)\,dx$$

而上式中的函数 $\Psi_{1n}(x)$，$i=1$，2 则具有如下形式：

$$\Psi_{1n}(x)=\sin\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_1}}x\right)$$

$$\Psi_{2n}(x)=A_{2n}\sin\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_1}}x\right)+B_{2n}\cos\left(\frac{\beta_n}{\sqrt{\alpha_2}}x\right)$$

其中的系数 A_{2n}和 B_{2n}为：

$$A_{2n}=\sin\omega\sin\left(\frac{a\lambda}{b}\right)+\mu\cos\omega\cos\left(\frac{a\lambda}{b}\right)$$

$$B_{2n}=-\mu\cos\omega\sin\left(\frac{a\lambda}{b}\right)+\sin\omega\cos\left(\frac{a\lambda}{b}\right)$$

其中，

$$\omega=\frac{\beta_n a}{\sqrt{\alpha_1}}\qquad \lambda=\frac{\beta_n b}{\sqrt{\alpha_2}}\qquad \mu=\frac{k_1}{k_2}\frac{\sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{\alpha_1}}$$

式中的特征值 β_n 可以通过求解下面的超越方程得到：

$$\begin{vmatrix}\sin\omega & -\sin\left(\frac{a\lambda}{b}\right) & -\cos\left(\frac{a\lambda}{b}\right)\\ \mu\cos\omega & -\cos\left(\frac{a\lambda}{b}\right) & \sin\left(\frac{a\lambda}{b}\right)\\ 0 & \cos\lambda & -\sin\lambda\end{vmatrix}=0$$

由式(5.43)给出的 SiO_2层及硅层中的温度分布函数的数值解可以利用商业化的软件包 MATHCAD 来计算求得。双层复合梁在所选择的瞬间内温度分布的变化曲线如图 5.31 所示。从图中可以确定，硅层达到输入温度为50℃所需要的时间为600 μs 左右。设计工程师可以根据这个信息来评估热致动器件的灵敏度。另外，正如在 4.4 节和 4.5 节中所介绍的，式(5.43)给出的温度分布表达式也可以用作热应力分析和界面断裂分析的输入条件。

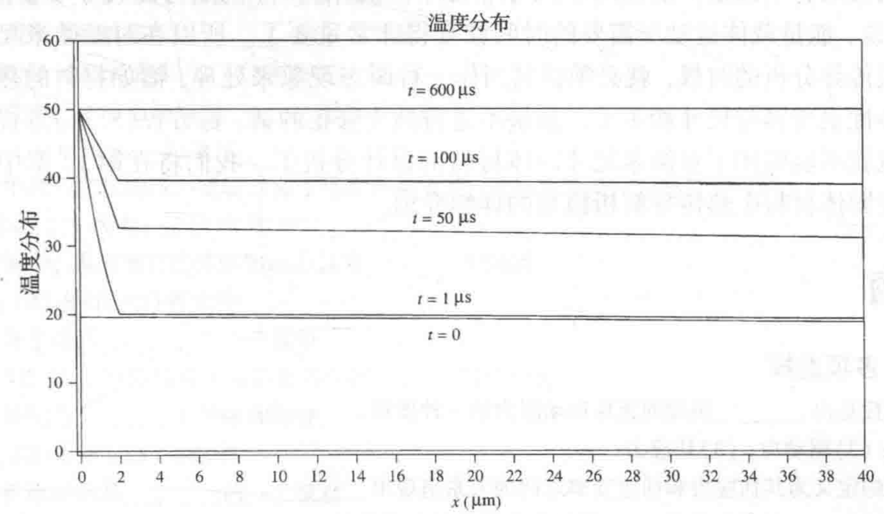


图 5.31　双层致动器中的温度变化

5.9 亚微米尺度下固体中的热传导

在5.7节的图5.19中，我们给出了一个关于固体材料中热传输特性的唯象模型，基于该模型发展了固体材料中热传导的傅里叶定律。将这个基本的物理定律与热力学第一定律相结合，就可以推导出式(5.31)所示的热传导方程，它可以用来计算由固体材料中发出或吸收的热通量引起的温度场分布。应用这个热传导方程，我们不仅能够评估各种热驱动的微型致动器的灵敏度，而且还能够在设计阶段分析微型致动器中与其强度以及尺度稳定性相关的应力和形变。

对于大多数固体结构来说，这个关于固体材料的热传导模型是十分精确可靠的，它对于微米尺度的结构来说也基本上可以正常使用。但是当固体结构的尺寸由宏观尺度缩小到亚微米甚至纳米尺度时，上述热传导模型的正确性就会逐渐丧失。究其原因，主要是因为当固体材料的尺寸急剧缩小之后，热载体对固体材料的热传输特性具有更为显著的影响。

众所周知，热量也是能量的一种表现形式。因此与其他形式的能量载体类似，热量的流动也需要一种载体。对于不同的物质来说，其热量的载体是有所不同的。例如，在金属材料中热量的载体主要是电子和声子，而在介质和半导体材料中，热量的载体则基本上以声子为主。在第12章中我们将了解到，声子可以看成是一群虚拟的质量粒子，它们表征了分子中晶格的能量状态。连接不同原子的晶格振动给声子和电子提供能量，也就是把物质中的热量传递给了声子和电子。因此热量在物质中的传输也就依赖于其中的声子运动或电子运动，声子运动对应于半导体中的热传输，而电子运动则对应于金属中的热传输。

对于和物质中热传输相关的电子及声子运动特性的研究是一个极其复杂的课题，它已经超出了本书的研究范围。我们可以设想固体材料中存在着无穷多个声子和电子，这些能量载体在固体材料中从提供能量的位置(即热源处)向其他位置处运动，在这个运动的过程中它们将会不可避免地与固体材料中存在的其他声子及电子发生数百万次的碰撞，因此这些运动的能量载体到达固体材料中其他位置处所需要的时间就成了影响热传输特性的一个重要参数。对于宏观尺度的固体材料来说，由于热传输所涉及到的时间常数非常短，不会明显地影响热传输的总体特性，因此碰撞所引起的路径改变以及能量载体在热传输过程中所需要的运动时间并不是关键的影响因素。然而对于尺寸非常小的固体材料(例如特征尺寸小于1 μm的固体材料)来说，能量载体运动所需要的时间就变得非常重要了。所以在对亚微米尺寸的固体材料进行热传导分析的时候，就必须将其当作一种瞬态现象来处理，诸如材料的热导率等一些唯象的特性也变得与尺寸相关了。如果不进行适当修正的话，像方程(5.31)那样的线性热传导方程也就不能应用于亚微米尺寸固体材料的设计分析了。我们将在第12章中给出有关亚微米尺度固体材料中热传导解析模型的详细介绍。

本章习题

第一部分：多项选择

1. 流体的黏性是由________引起的流体运动阻力的一种度量。
   (1)压力；(2)驱动力；(3)切应力
2. 牛顿流体的定义为其切应力和切应变率之间的关系呈现出________。
   (1)线性关系；(2)非线性关系；(3)线性和非线性混合的特性

3. 雷诺数和流体的________特性相关。
   (1)静止；(2)运动；(3)任意状态
4. 雷诺数和流体的________成正比。
   (1)位移；(2)速度；(3)压强
5. 流体动力学分析中的控制体是________。
   (1)待分析流体中的一个方便选取的体积
   (2)雷诺数是常数的流体中的体积
   (3)流体特性是常数的流体中的体积
6. 一个层流流动意味着________的流体流动。
   (1)低速；(2)高速；(3)准静态
7. 当雷诺数位于________范围内时，可压缩流体通常会发生层流流动。
   (1)0 ~ 10；(2)10 ~ 100；(3)100 ~ 1000
8. 一般说来，微系统中的流体流动属于________。
   (1)层流；(2)湍流；(3)既不是层流也不是湍流
9. 连续性方程是用来计算________的。
   (1)体积流速；(2)运动与驱动力之间的关系；(3)运动流体的诱生力
10. 动量方程是用来计算________的。
   (1)体积流速；(2)运动与驱动力之间的关系；(3)运动流体的诱生力
11. 我们将采用________来计算流体对微系统部件的作用力。
   (1)连续性方程；(2)动量方程；(3)运动方程
12. 水力学直径是用来计算流体在________导管中流动的横截面积。
   (1)圆形；(2)矩形；(3)任何形状
13. CFD 代表________。
   (1)临界流动力学；(2)计算流体动力学；(3)计算机化的流体动力学
14. Navier-Stokes 方程与运动流体中的________相关。
   (1)压强-流速；(2)压强-密度变化；(3)压强-黏度
15. 流体的表面张力是________。
   (1)外加在流体表面的张力；(2)流体表面存在的张力；(3)形成流体表面的张力
16. 表面张力是导致________的主要原因。
   (1)毛细管效应；(2)牛顿流体；(3)层流现象
17. 流体的表面张力系数是流体________的一个度量。
   (1)固有强度；(2)表面张力；(3)表面拓扑
18. 在微小导管中流体的毛细高度________导管的直径。
   (1)等于；(2)正比于；(3)反比于
19. 圆形导管中两点之间的压力差驱动着流体在其中流动，该压力差反比于导管直径的________。
   (1)2 次方；(2)3 次方；(3)4 次方
20. 在微型导管中，压电泵对流体的驱动力具有________的特性。
   (1)线性；(2)表面；(3)容积性
21. 材料的热导率是其________的一个度量。
   (1)热传导能力；(2)热传导阻力和电传导阻力；(3)热传导速度
22. 金属的导热能力________半导体和陶瓷。
   (1)优于；(2)低于；(3)类似于
23. 材料的热扩散率是其________的一个度量。
   (1)热传导能力；(2)热传导阻力和电传导阻力；(3)热传导速度

24. 热通量是在给定的时间内固体单位________热传导的一个度量。
(1)长度；(2)面积；(3)体积
25. 热通量是一个________。
(1)标量；(2)矢量；(3)张量
26. 电阻在固体材料上产生的热量与________相关。
(1)电流和电阻；(2)电压和电阻；(3)电感和电阻
27. 对于微型热致动器来说，我们应该选择具有________的致动材料。
(1)高热导率；(2)高热扩散率；(3)以上两项都不对
28. 对于微系统中的部件来说，牛顿冷却定律通常用于其与________接触的分析中。
(1)流体；(2)另一个固体部件；(3)任何物质
29. 与固体接触的流体的传热系数________流体流动的速度。
(1)等于；(2)正比于；(3)反比于
30. 自然(或自由)对流的热传输是由________驱动的。
(1)流体驱动力；(2)流体的压降；(3)流体的加热或冷却引起的流体密度变化
31. 如果周围的流体处于________状态，固体的表面就会呈现绝热特性。
(1)高速运动；(2)低速运动；(3)静止
32. 努塞尔(Nusselt)数越大，流体的热传输系数就会________。
(1)越大；(2)越小；(3)保持不变
33. 在热驱动的微型泵中，我们必须特别注意致动元件与接触流体之间的热________。
(1)传导；(2)对流；(3)辐射
34. 当热致动的元件与工作流体相接触时，其界面处的温度会________整体的流体温度。
(1)低于；(2)基本等于；(3)高于
35. 通常有________种类型的边界条件与固体材料的热传导分析有关。
(1)3；(2)4；(3)5
36. 在设计一个热致动的梁单元时，我们主要会关注________。
(1)梁的重量；(2)梁的机械强度；(3)梁的热响应
37. 在热致动微器件的设计中，热传导分析对于后续的________分析是必要的。
(1)热应力；(2)热耗散；(3)安全性
38. 当固体的尺寸________1 μm时，我们就必须注意使用连续介质热传导理论的合理性。
(1)大于；(2)大致等于；(3)小于
39. 一般说来，固体中的热传输是依靠________实现的。
(1)分子的晶格振动；(2)固体中的声子运动；(3)固体中声子及电子的运动
40. 在亚微米尺度和纳米尺度的介质及半导体材料中，固体的热传输主要是依靠________实现的。
(1)分子的晶格振动；(2)固体中的声子运动；(3)固体中声子及电子的运动

第二部分：计算题

1. 列出下列流体在标准条件下(一个大气压，20℃)的动力黏度(单位是牛顿·秒/平方米，即Pa·s)：氢气、氩气、氦气、氧气、氮气、水、过氧化氢和硅油。
2. 当$d_1 = 500$ μm，$d_2 = 50$ μm时，重新求解例题5.1中的问题。
3. 估算例题5.2中止回阀(如图5.8所示)的开口量以及该微器件中的气流速度，并确定此阀是否能够允许气体以30 000 cm^3/min的流量通过。
4. 一个微型阀能够允许气体以1 m/s的速度按照1 cm^3/min的流量通过，试估算该微型阀所需要的驱动功率及其阀门开启的倾角θ。如图5.32(a)所示，该微型阀是通过一组嵌入在其上的平板电极来驱动的，电极的宽度与阀门相同，如图5.32(b)所示。我们可以假设电极之间的介质就是介电常数与空气相同的气

体，平板阀门的尺寸如图 5.32(b)所示。[提示：如图 5.32(b)所示，可以首先求出能够供气体正常通过的阀门间隙 H 的合理数值，并使用线性变化分布负载的梁理论来求解。]

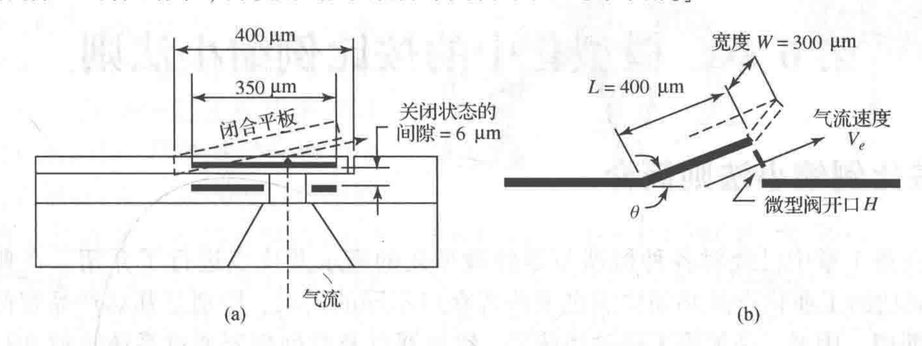


图 5.32　静电驱动微型阀的电极尺寸：(a)气流的通路；(b)微型阀的开口

5. 在例题 5.3 中使用 Hagen-Poiseuille 方程而不是式(5.17)，来重新估算题中的压降，并比较二者的结果。
6. 水在直径为 20 μm 的毛细管中流过 1000 μm 的长度。利用 Hagen-Poiseuille 方程求出水流的压降，并估算出由于水的表面张力而引起的附加压降。我们假设该毛细管中水的流动为层流模式，其雷诺数 $Re \leq 1000$。(提示：可以使用表 4.3 中给出的有关水的动力黏度的两个极端数值，来确定水在毛细管中的体积流速范围。)
7. 在上一题(即第 6 题)中，将毛细管的一端竖直插入一个盛水的罐中，由于毛细管效应的作用，毛细管中的水面会上升多高的高度？
8. 根据热致动材料的灵敏度，对第 7 章表 7.3 中列出的常用于 MEMS 的各种材料进行排序。该灵敏度定义为在热力的作用下，材料被加热或冷却的快慢程度。
9. 试证明式(5.38)所示的对流热传输边界条件既包括给定温度的边界条件，也包括给定热通量的边界条件。例如，当 $h = 0$ 时，即对应于绝热边界条件，而当 $h \to \infty$ 时，则对应于给定温度的边界条件。
10. 要对如图 5.33 所示的一个热致动的梁进行热分析，试确定合适的边界条件。在铜膜上施加电流(i)和电压(V)来产生热驱动力。如果有必要，可以使用第 7 章表 7.3 中给出的材料特性参数。沿 x-y 平面法向的热流可以忽略。

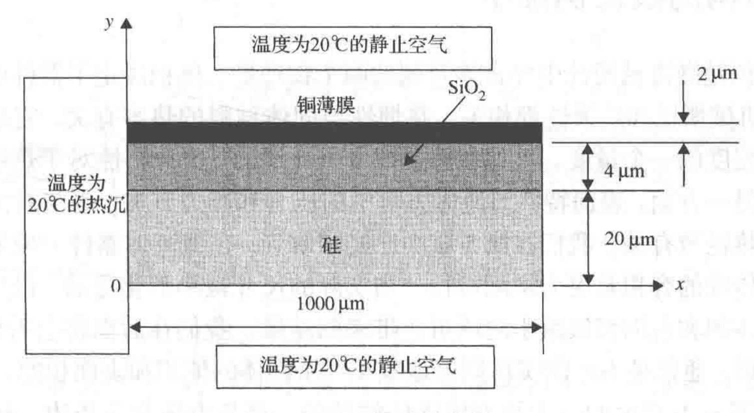


图 5.33　热致动的梁

11. 如图 5.33 所示的一个热致动的梁，初始时刻其温度均匀且为 20℃。试列出求解其温度上升情况的微分方程组及合适的边界条件。不必求解该方程组。
12. 列出求解如图 5.33 所示系统中各部件温度场的微分方程组。铜膜给系统中产生的热被周围的空气带走。周围空气的总体温度为 20℃，自然对流的热传输系数为 h。

第6章　微型化中的按比例缩小法则

6.1　按比例缩小法则简介

我们在第1章中已经对各种机器与器件微型化的需求及优点进行了介绍。在典型情况下，一个成功的工业化产品必须要满足消费者众多不同的需求，特别是其对产品智能化和多功能化的期望。因此，必须将大量的传感器、致动器以及微处理器通过系统集成和封装的方式整合到各种产品中。受这些产品在尺寸和几何结构方面的约束，要求上述各种传感器、致动器以及微处理器必须实现体积的微型化。因此考虑到实际的外形、体积、重量和经济等原因，工程师们必须对各种工业新产品的微型化不断付出更多的努力。本章的目的是要给工程师们提供一些可供选择的按比例缩小法则，使他们意识到不断缩小各种机器与器件的尺寸会带来哪些物理后果。必须牢记的是，某些微型化的要求或者是实际不可行的，或者是在经济上没有什么意义的。

通常有两种按比例缩小法则可以应用于微系统的设计中。第一种法则是按照物体的实际尺寸，例如几何结构的尺寸进行按比例缩小，同样属于这类法则的是由物理规律所决定的物体特性。这种按比例缩小法则的实例包括刚体动力学、静电和电磁力的按比例缩小。第二种法则涉及微系统表观特性的按比例缩小，这类按比例缩小法则涉及到系统的尺寸和材料特性，因此可用来处理微系统中大多数的热流体问题。亚微米和纳米尺度材料特性的按比例缩小问题将在第12章中介绍。

6.2　几何结构的按比例缩小

体积和表面积是微机械设计中经常涉及到的两个物理量。体积决定了器件中各部件的质量和重量，也就与机械惯性和热惯性都相关。热惯性与固体材料的热容有关，它是我们加热或冷却固体材料快慢程度的一个量度。正如在第5章中所介绍的，这种特性对于热致动器件的设计是非常重要的。另一方面，表面特性与流体力学中的压力和浮力有关，也与对流热传输过程中固体的热吸收和热耗散有关。我们在第5章中已经了解到，在微流体器件中使用表面泵要比在宏观系统中使用传统的容积泵更为实际可行。当实际的尺寸被小型化之后，设计工程师必须权衡特定的器件在体积和表面积被减小之后可能带来的结果。我们在后面将会看到，在经过按比例缩小的过程之后，通常是不可能实现同等地减小一个物体的体积和表面积的。

我们来看如图6.1所示的一个长方体固体的例子。该长方体有3条边，分别为 $a>b>c$。很容易得知其体积为 $V=abc$，表面积为 $S=2\times(ac+bc+ab)$。如果我们以 l 代表一个固体的线性尺度，那么该固体的体积为 $V\propto l^3$，表面积为 $S\propto l^2$，由此可以导出下面的关系式：

$$\frac{S}{V}=l^{-1} \tag{6.1}$$

a　b　c

图6.1　一个长方体结构的固体

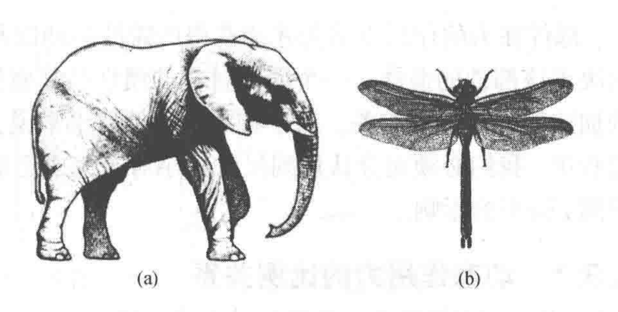


图 6.2　两种物体明显不同的表面积-体积比：(a)大象($S/V \approx 10^{-4}$/mm)；(b)蜻蜓($S/V \approx 10^{-1}$/mm)

图 6.2 给出了两种生物体——大象和蜻蜓的有趣对比，它们各自的 S/V 之比大约为 10^{-4}/mm 和 10^{-1}/mm。这些明显不同的 S/V 之比解释了为什么蜻蜓只需要提供很少的能量和功率就可以完成飞行的动作，因此其对食物和水的消耗也就很低；而大象即使进行很缓慢的运动也要消耗大量的食物以便产生足够的能量(和功率)。而且蜻蜓较大的 S/V 之比也使得它更适于飞行，因为其较大的表面积在空气动力学上可以产生较大的浮力，从而克服与其体积相关的较小的体重。

根据式(6.1)所反映的比例关系可知，尺寸缩小为原来的 1/10(即 $l=0.1$)，意味着体积缩小为原来的千分之一($1/10^3$)，而表面积则仅仅缩小为原来的百分之一($1/10^2$)。当然，体积缩小为原来的千分之一意味着重量也将缩小为原来的千分之一。我们很容易证明，对于其他几何形状的固体也同样满足上述比例关系。

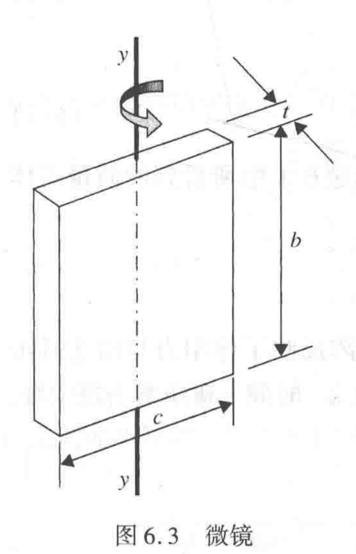


图 6.3　微镜

例题 6.1　我们在第 1 章中已经提到，微镜是通信中光纤网络微开关中的重要部件。这些微镜必须能够按照严格控制的要求进行高速旋转，其角动量是控制旋转角度和转速的一个主要因素。在本例题中，我们将计算在微镜尺寸减小 50% 的情况下转动微镜所需扭矩的减小量。微镜的安装情况及尺寸如图 6.3 所示。

解答： 围绕 y-y 轴转动微镜所需要的扭矩与微镜的质量惯性矩 I_{yy} 有关，该质量惯性矩可以表示为[Beer 和 Johnston, 1988]：

$$I_{yy} = \frac{1}{12}Mc^2$$

式中，M 是微镜的质量，c 是微镜的宽度。

考虑到微镜的质量为 $M=\rho V=\rho(bct)$，ρ 是微镜材料的质量密度，因此微镜的质量惯性矩可以表示为：

$$I_{yy} = \frac{1}{12}\rho bc^3 t \tag{6.2}$$

当微镜的尺寸缩小 50% 之后，微镜的质量惯性矩将会变为：

$$I'_{yy} = \frac{1}{12}\rho\left[\left(\frac{1}{2}b\right)\left(\frac{1}{2}c\right)^3\left(\frac{1}{2}t\right)\right] = \frac{1}{32}\left[\frac{1}{12}\rho bc^3 t\right] = \frac{1}{32}I_{yy}$$

通过上面简单的计算显然可知，质量惯性矩减小为原来的 1/32。因此当微镜的尺寸减小 50% 之后，转动微镜所需要的扭矩则减小为原来的 1/32。

6.3　刚体动力学中的按比例缩小

在第 4 章中，我们已经展示了工程力学在 MEMS 器件及微系统设计中的重要作用。移动任意一个部件都需要力的作用，而作用力需要借助能源来产生。移动部件所需作用力的大

小、部件在力的作用下多久才能获得所需的运动以及使一个运动部件终止运动的难易程度都取决于该部件的惯性。一个固体材料的惯性与其质量以及起动或者终止该固体材料运动所需的加速度或减速度有关。对于特定的运动要求来说，在缩小固体材料惯性以及所需作用力的过程中，我们必须充分认识到尺寸减小对于完成运动所需的功率 P、作用力 F、压力 p 及所需时间 t 带来的影响。

6.3.1　动态作用力的比例关系

设想某个刚体从一个位置运动到另一个位置，该固体材料运动的距离 s 可以表示为 $s \propto l$，此处 l 代表线性尺度。其速度为 $v = s/t$，因此 $v \propto (l)t^{-1}$，其中 t 是所需的运动时间。

根据质点的运动学定律，可以得到：

$$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \tag{6.3}$$

式中，v_0为初始速度；a 为加速度。

通过令 $v_0 = 0$，可以利用式(6.3)将加速度表示为：

$$a = \frac{2s}{t^2} \tag{6.4}$$

根据牛顿第二定律，动态作用力 F 可以表示为：

$$F = Ma = \frac{2sM}{t^2} \propto (l)(l^3)t^{-2} \tag{6.5}$$

读者在此可以看到，质点的质量 M 与 l^3 成正比，也就是我们在例题 6.1 中所看到的质量与体积之间呈线性关系。

6.3.2　Trimmer 力缩比矢量

Trimmer 在[Trimmer, 1989]中提出了一个独特的矩阵，该矩阵反映了作用力与描述系统缩小之后的各项运动参数之间的关系，这些运动参数包括加速度 a、时间 t 和功率密度 P/V_0 等。该矩阵被称作力缩比矢量 $\mathbf{F}$。

力缩比矢量的定义为：

$$\mathbf{F} = [l^F] = \begin{bmatrix} l^1 \\ l^2 \\ l^3 \\ l^4 \end{bmatrix} \tag{6.6}$$

基于上面这个矢量，我们接下来可以推导出其他相关的物理量。

加速度 a　利用式(6.5)中的第一部分，即 $F = Ma$，就可得到 $a = F/M$。由此可得出下面的比例关系：

$$\mathbf{a} = [l^F][l^3]^{-1} = [l^F][l^{-3}] = \begin{bmatrix} l^1 \\ l^2 \\ l^3 \\ l^4 \end{bmatrix} [l^{-3}] = \begin{bmatrix} l^{-2} \\ l^{-1} \\ l^0 \\ l^1 \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

时间 t　利用式(6.5)中的第二部分，可以得到瞬态时间的表达式，由此可以得到下面的比例关系：

$$t=\sqrt{\frac{2sM}{F}}\propto([l^1][l^3])^{1/2}[l^F]^{-1/2}=[l^2][l^F]^{-\frac{1}{2}}$$

$$=\begin{bmatrix}l^1\\l^2\\l^3\\l^4\end{bmatrix}^{-1/2}[l^2]=\begin{bmatrix}l^{-1/2}\\l^{-1}\\l^{-1.5}\\l^{-2}\end{bmatrix}[l^2]=\begin{bmatrix}l^{1.5}\\l^1\\l^{0.5}\\l^0\end{bmatrix} \tag{6.8}$$

功率密度 P/V_0　很显然，如果没有电源的动力供应，无论是固体还是液体都无法产生运动。因此电源的功率在微系统的设计中是一个很重要的参数。微系统的电源供应不足将导致系统无法正常运动。另一方面，过量的电源供应也会使系统的结构因过热而遭到破坏。微系统过量的功率需求还会增加其运行成本，同时也会缩短植入人体内的生物医学器件的有效工作寿命。这里，我们讨论的是功率密度而不是单位时间的能量供应，功率密度定义为单位体积 V_0 内的功率供应 P。

我们从移动质量为 M 的固体运动一段距离 s 所做的功入手，来推导所需提供的功率。数学上，所做的功等于作用力乘以所经过的位移，即 $W=F\times s$。而功率则是定义为单位时间内所做的功，即 $P=W/t$，因此功率密度可以表示为：

$$\frac{P}{V_0}=\frac{Fs}{tV_0} \tag{6.9}$$

由此可以得到功率密度与力缩比矢量之间的关系如下：

$$\frac{P}{V_0}=\frac{[l^F][l^1]}{\{[l^1][l^3][l^{-F}]\}^{\frac{1}{2}}[l^3]}=[l^{1.5F}][l^{-4}]=[l^F]^{1.5}[l^{-4}]$$

$$=\begin{bmatrix}l^1\\l^2\\l^3\\l^4\end{bmatrix}^{1.5}[l^{-4}]=\begin{bmatrix}l^{-2.5}\\l^{-1}\\l^{0.5}\\l^2\end{bmatrix} \tag{6.10}$$

将式(6.6)、式(6.7)、式(6.8)和式(6.10)结合在一起，就可以得出一组关于刚体动力学的按比例缩小法则，如表 6.1 所示。

表 6.1　刚体动力学的按比例缩小法则

阶　数	作用力 F	加速度 a	时间 t	功率密度 P/V_0
1	l^1	l^{-2}	$l^{1.5}$	$l^{-2.5}$
2	l^2	l^{-1}	l^1	l^{-1}
3	l^3	l^0	$l^{0.5}$	$l^{0.5}$
4	l^4	l^1	l^0	l^2

表 6.1 在将器件尺寸按比例缩小的设计过程中是非常有用的。表中的阶数表示左边第二列中力缩比矢量对应的缩小阶数。

例题 6.2　当一个 MEMS 器件的重量减小为原来的 1/10 时，估算其加速度 a、时间 t 以及驱动功率发生的相应变化。

解答：由于固体的重量等于其质量乘以重力加速度，而质量与其线性尺度的立方成正比，因此可以得到重量 $W\propto l^3$，这也就对应于表 6.1 中的三阶。从该表格中可以得出下面的信息：

1. 加速度没有缩小(l^0)；

2. 完成运动所需时间的缩小因子为$(l)^{0.5}=(10)^{0.5}=3.16$，即时间缩短为原来的1/3.16；

3. 功率密度(P/V_0)的缩小因子为$(l)^{0.5}=3.16$，即功率密度减小为原来的1/3.16，而功耗则减小为$P=3.16V_0$，由于器件体积的缩小因子是10，因此尺寸缩小后功耗的缩小因子为$P=3.16/10\approx0.3$倍，即功耗将增大为原来的3.16倍。

6.4 静电力中的缩比特性

静电作用力的数学表达式在2.3.4节中已经给出。我们在此将回顾一下平行板电容器的结构，如图6.4所示。

该平行板中的电势能为：

$$U=-\frac{1}{2}CV^2=-\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r WL}{2d}V^2 \quad [式(2.7)]$$

式中，ε_0是真空中的介电常数，而ε_r则是两个电极之间电介质的相对介电常数；V是外加的电压，这个外加电压通常称作电容器的击穿电压。

由于Paschen效应[Madou，1997]的影响，式(2.7)中的击穿电压V将随着两个平行板之间的距离改变而发生变化，该效应如图6.5所示。

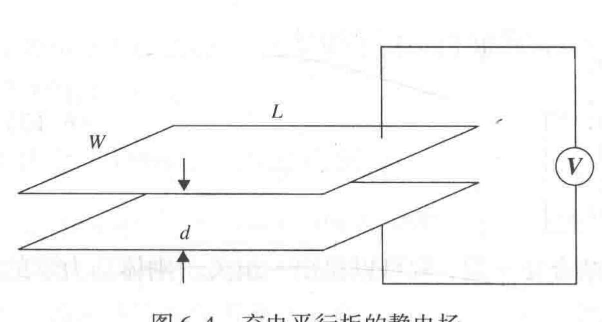


图6.4　充电平行板的静电场

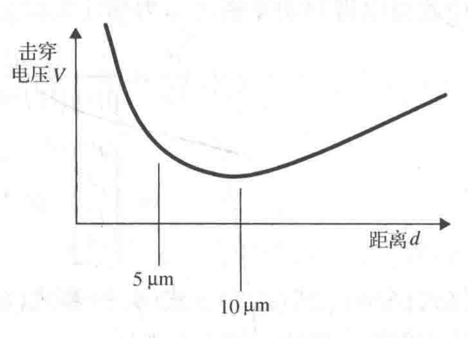


图6.5　Paschen效应

从图6.5中可以看到，当间距$d<5\ \mu m$时，随着间距的增加击穿电压V将急剧下降。而当$d>5\ \mu m$时，击穿电压随着间距增加而减小的这个趋势明显减缓。当$d\approx10\ \mu m$时，电压变化的方向将发生改变。此时进一步增加间距，击穿电压将持续线性增大。

当正常的工作范围$d>10\ \mu m$时，可以推断出外加电压$V\propto d$，或者也可以表示为$V\propto l^1$。在式(2.7)中，ε_0和ε_r的缩比效应是中性的，即ε_0，$\varepsilon_r\propto l^0$。由此可以把式(2.7)中静电势能的缩比特性表示为如下形式：

$$U\propto\frac{(l^0)(l^0)(l^1)(l^1)(l^1)^2}{l^1}=(l^3) \tag{6.11}$$

式(6.11)所反映的缩比特性表明，当线性尺寸(即W、L和d)同时缩小为原来的十分之一(1/10)时，电势能将减小为原来的千分之一($1/10^3$)。

现在来考察静电力的缩比特性。我们从第2章中可知，在平行板排列的3个不同方向上都可以产生静电力。这些静电力的表达式如式(2.8)、式(2.10)以及式(2.11)所示。我们将这些表达式重新列在下面：

$$F_d = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r WLV^2}{d^2} \quad [式(2.8)]$$

$$F_W = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r LV^2}{d} \quad [式(2.10)]$$

$$F_L = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r WV^2}{d} \quad [式(2.11)]$$

这些作用力的方向如图6.6所示。下面我们将展示如何通过简单的推导方法来得到这些作用力的缩比法则。

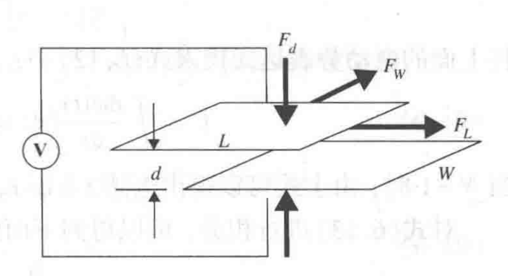


图6.6 与充电平行板相关的静电力

从式(2.8)、式(2.10)和式(2.11)中可见，3个作用力分量为F_d、F_W和$F_L \propto (l^2)$，这意味着静电力在表6.1中的作用力缩比阶数是2阶的。这实际上也就表明，如果平行板的尺寸缩小为原来的十分之一(1/10)，则静电力将会减小为原来的百分之一(1/100)。

例题6.3 如图6.6所示，如果一对平行板电极的长度L和宽度W都减小为原来的十分之一，试求该平行板电极产生的静电力减小的程度。

解答：由于平行板电极之间的距离d保持不变，因此根据式(2.8)、式(2.10)和式(2.11)，可以得到各个静电力分量的缩比特性为：

法向静电力分量：$F_d \propto l^2$；

沿着宽度方向的静电力分量：$F_W \propto l$；

沿着长度方向的静电力分量：$F_L \propto l$。

由此可见，法向静电力分量的缩小因子为$10^2 = 100$，即法向静电力分量缩小为原来的百分之一，而沿着宽度方向和长度方向的静电力分量的缩小因子均为10，即沿着宽度方向和长度方向的静电力分量均缩小为原来的十分之一。

6.5 电磁力的缩比特性

虽然电磁力已经成为大多数宏观机器中主要采用的驱动力，但是我们在第2章中却没有介绍电磁力驱动器件的基本原理，这主要是因为电磁作用力不像静电作用力那样容易按照一定的比例缩小，在本节中将看到这一点。然而读者也不应完全排除电磁致动原理的应用，事实上它已经在一些介观尺度的机床中获得了应用，一个这样的应用实例就是用来驱动一辆微型化的汽车[Teshigahara等人，1995]，如图1.19所示。

经典的电磁学理论指出，当处于磁感应强度为**B**的磁场中的导体通入电流i时，该导体或导电线圈上将会感受到电磁力**F**的作用。在下面的表达式中，**B**代表磁场强度的大小，其单位是韦伯每平方米(Wb/m^2)；i是通过的电流强度，其单位是安培(A)。电流反映的是单位时间内通过单位面积导体流过的电子，数学上可以表述为$i = Q/t$，其中Q代表流过单位面积导体的电荷，t是时间。电动势(emf)则是驱动电子流过导体的“作用力”。驱动这些电荷

所需的能量可以表示为：

$$U = \int dU = \int e\, dQ \tag{6.12}$$

当一个通有电流的导体位于磁通量为 ϕ 的磁场中时，利用众所周知的法拉第定律可以将 N 匝导体线圈中感生的电动势表示为：

$$e = N\frac{d\phi(t)}{dt}$$

将上面的电动势表达式代入式(6.12)中，并利用 $Q = it$，可以得到：

$$U = \int \frac{d\phi(t)}{dt} i\, dt = \int i\, d\phi(t) = \frac{1}{L}\int \phi(t)\, d\phi(t) \tag{6.13}$$

当 $N=1$ 时，由上式可以得出电感 $L=\phi/i$。

对式(6.13)进行积分，可以得到下面的关系式：

$$U = \frac{1}{2}\frac{\phi^2}{L} \tag{6.14a}$$

或

$$U = \tfrac{1}{2}Li^2 \tag{6.14b}$$

产生的电磁力将会随着导体在磁场中相对位置的改变而发生变化。因此可以推导出这些电磁力的表达式为：

$$\mathbf{F} = \frac{\partial U}{\partial x}\bigg|_{\phi=\text{常数}} \tag{6.15a}$$

或

$$\mathbf{F} = \frac{\partial U}{\partial x}\bigg|_{i=\text{常数}} \tag{6.15b}$$

如果考虑恒定电流流动的情况，即式(6.15b)所反映的情形，则产生的电磁力还可以表示为：

$$F = \frac{1}{2}i^2\frac{\partial L}{\partial x} \tag{6.16}$$

仔细考察式(6.16)中的各物理量，我们发现，电流 i(即流过导体的电子数量)与导体的横截面积有关，即 $i \propto l^2$；而$\partial L/\partial x$ 项是无量纲的。因此可以确认电磁力 $\mathbf{F}$ 的缩比特性为：

$$\mathbf{F} \propto (l^2)(l^2) = l^4 \tag{6.17}$$

从上式反映的缩比特性可知：当尺寸(l)减小为原来的十分之一时，将导致电磁力减小为原来的万分之一($1/10^4$)，这与静电力与 l^2 成比例形成显著的对比，同样情况下静电力仅仅减小为原来的百分之一($1/10^2$)。因此可以得出这样的结论，即电磁力在缩比特性方面不受欢迎的程度差不多是静电力的100倍。将式(6.17)所反映的按比例缩小法则与6.4节介绍的静电力的按比例缩小法则做对比，就可以解释为什么几乎所有的微马达和致动器都是采用静电力来驱动的，而宏观世界的马达和致动器通常都是采用电磁力来驱动的。另一个显而易见的原因是在微器件中也没有足够大的空间来容纳产生足够驱动磁场所必需的电感线圈。

尽管我们在上面指出了静电驱动的诸多优点，但是工程师们也不应该忽视使用静电力致动的缺点。静电致动的一个明显不足就是其固有的驱动力较小，不过好在用于驱动大多数微器件所需的力通常都不是很大。

6.6　电学中的缩比特性

电能是很多 MEMS 和微系统中的主要能源。电能的主要应用情况包括我们在第 2 章中介绍的用于多种微系统中的静电致动、压电致动以及和电阻加热致动等，电动力泵也是目前广泛应用于微系统中的一种驱动方法，机电转换则是电能在微系统中常见的另外一种应用形式。因此电能应用中的缩比特性也是一个非常重要的设计问题。

某些涉及到电学特性的按比例缩小法则可以由下面几个简单的物理定律推导出来：

$$\text{电阻：} R = \frac{\rho L}{A} \propto (l)^{-1} \tag{6.18}$$

式中，ρ 是导体材料的电阻率，L 是导体材料的长度，A 则是导体材料的截面积。

$$\text{电阻上的功率损耗：} P = \frac{V^2}{R} \propto (l)^1 \tag{6.19}$$

式中，V 是电阻上的外加电压。

$$\text{电场能：} U = \tfrac{1}{2}\varepsilon E^2 \propto (l)^{-2} \tag{6.20}$$

式中，ε 是介质材料的介电常数，正比于$(l)^0$；E 是电场强度，正比于$(l)^{-1}$。

上面给出的按比例缩小法则对于器件的微型化是非常有用的，但是其中关键的问题是微型化过程中供电电源的缩比特性。例如，式(6.19)中由于材料的电阻引起的功率损耗服从一阶的缩比法则，即 $P \propto l^1$；而对一个自带电源的系统，例如一个静电致动电路，其可以使用的电源容量直接与系统的体积相关，即 $E_{av} \propto (l)^3$。完成预期的设计功能所需的功率损耗与其实际可获得的能量(或电源功率)之间的比率为：

$$\frac{P}{E_{av}} = \frac{(l)^1}{(l)^3} = (l)^{-2} \tag{6.21}$$

式(6.21)所示的关系反映了按比例缩小电源系统尺寸时带来的一个严重的缺点。举例来说，这意味着当电源系统的尺寸(l)(例如电源中用于传导电流的导体材料的线性尺寸)减小为原来的十分之一时，就会由于导体电阻的增加而导致其上功率损耗增大 100 倍。

6.7　流体力学中的缩比特性

我们在第 5 章中已经了解到，流体可以在剪切力(或切应力)的作用下发生流动，并且基于 Navier-Stokers 方程的连续流体力学对于亚微米和纳米尺度的流动将会不再有效。发生毛细管效应是其失效的主要原因。本节中我们将探讨为什么毛细管流动不能随意地按比例缩小，以及在微流动中还有什么好的变通方法。

我们来看图 6.7 所示的一块流体的情形。该流体的体积 V 可由其底面积(A)乘以其高度(h)得出。假定该流体在两个假想的平行平板之间的初始形状是一个长方体，沿着 x 方向向右移动上面的平板就使液体发生流动，此时原来的长方体形状的流体就变成了平行六面体，如图 6.7 所示。作用于该流体上并使其发生流动的剪切力可以由切应力 τ 来表示。剪切力对流体的作用导致流体产生了一个瞬时速度的分布，其变化范围是从顶部的最大值到底部的零。对于牛顿流动来说，从顶部到底部之间的速度变化遵循线性关系，如图 6.7 所示。我

们在第5章的式(5.1)和式(5.2)中定义的流体黏度引起了运动流体速度的变化。下面再用另外一种方式来表示流体的黏度，即：

$$\mu = \frac{\tau}{R_s} \tag{6.22}$$

式中，μ 是流体的动力黏度，其单位为 Pa·s；$R_s = V_{max}/h$ 是剪切速率。切应力 $\tau = F_s/A$，其中 F_s 为剪切力。

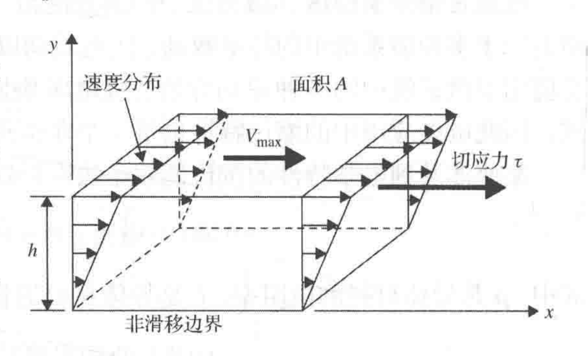


图6.7　一定体积流体中的速度分布

利用流体的平均速度和流体通道的截面积可以求出流体的体积流速为：

$$Q = A_s V_{ave} \tag{6.23}$$

式中，A_s 是流体通道的截面积；V_{ave} 是流体的平均速度。

我们从第5章中已经得知，几乎所有微尺度下的流体流动都是处于层流模式。因此5.4节中有关圆形导管中层流体流动的公式都可以用来推导微尺度下流体流动的按比例缩小法则。

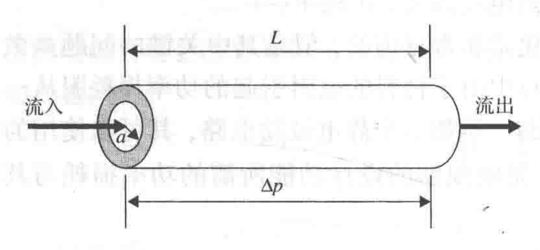


图6.8　小圆导管中的流体流动

图6.8展示了流体流经长度为 L、半径为 a 的一个小圆导管的情形。流过该长度为 L 的圆形导管的压降 ΔP 可以利用式(5.17)所示的Hagen-Poiseuille定律来计算求得。流体的体积流速 Q 也可以利用相同的方程来求得，只是其形式有所不同：

$$Q = \frac{\pi a^4 \Delta P}{8\mu L} \tag{6.24}$$

式中，a 是导管的半径；ΔP 是长度为 L 的导管两端的压降。

根据式(6.23)，流体的平均速度 V_{ave} 可以表示为：

$$V_{ave} = \frac{Q}{\pi a^2}$$

压力的梯度则为：

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = -\frac{8\mu V_{ave}}{a^2}、$$

由此可以计算出长度为 L 的一段毛细管两端的压降为：

$$\Delta P = -\frac{8\mu V_{ave} L}{a^2} \tag{6.25}$$

因此可以推导出毛细管内流体流动的按比例缩小法则：根据式(6.24)，流体的体积流速 Q 与 a^4 成正比；而根据式(6.25)，单位长度毛细管两端的压降 $\Delta P/L$ 与 a^{-2} 成正比，其中，a 为导管的半径。

例题6.4　假如把圆形导管的半径减小为原来的十分之一，试应用按比例缩小法则估算出导管中体积流速和压降的变化，并观察此例中的缩比结果。

解答： 根据式(6.24)，我们知道体积流速 Q 与 a^4 成正比，其中，a 为导管的半径。根据

这个缩比法则，体积流速将减小为原来的万分之一($1/10^4$)。同样，式(6.25)所示的缩比法则表明单位长度的压降提高为原来的100(10^2)倍。

显然，这种情况对于器件尺寸的减小是非常不利的。因此对于微流体流动，必须选择基于其他机理的驱动方法。

我们来考虑毛细管内流体流动的缩比特性，当其管径在很小的微米尺度时，一个更为完整的微流体流动的缩比法则还应该包括毛细管效应。如5.6节中的介绍，毛细管效应发生于微小导管中的液体流动，这种效应是因为流体的表面张力在小尺寸下将起主导作用。

克服表面张力所需的压力由式(5.24a)和式(5.24b)给出，从中可以看到，$\Delta P \propto a^{-1}$，其中a是导管的半径。因此可以利用下面的关系式来估算微米尺度导管中单位长度液体的压降：

$$\frac{\Delta P}{L} \propto l^{-3} \tag{6.26}$$

例题6.5　在例题6.4中，如果导管的半径在微米尺度，导管中流体上的压降将会发生什么样的变化?

解答：根据式(6.26)所反映的缩比法则，当微米尺度导管的半径减小为原来的十分之一时，单位长度导管上的压降将增大为原来的1000倍，因此，这种情况要比例题6.4中处于介观或宏观的情况提高了一个数量级。

在微米和亚微米尺度下，由于流体流动的缩比特性所引起的这种严重的负面效应已经促使工程师们去寻找各种可以代替传统容积泵驱动的新型流体驱动原理。这些新原理包括压电、电渗、电湿润和电液动力驱动[Madou，1997]。许多这些特殊的驱动技术都是基于表面驱动力，它们在微观领域的缩比特性要优于传统的容积驱动力。一个典型的基于表面驱动力的驱动技术就是压电泵。

压电驱动的原理是利用导管壁上产生的力代替传统的压差来驱动流体流动。这种驱动流体的方式类似于从一个塑料管状容器中挤牙膏。表面力F与导管的内壁面积成正比，其缩比特性要远远优于驱动相同体积流体所需的背压力，如式(6.25)所示。表面力之所以优于容积驱动压力，原因在于图6.8所示的微型导管内壁的表面积为$S=2\pi aL$，而对应的流体体积为$V=\pi a^2 L$，这两个关系式导致流体的表面积与体积之比为$S/V=2/a$。由于驱动一定体积流体的表面力与表面积成正比，我们很容易从S/V之比中得出$F \propto l^{-1}$。因此可知，减小导管的半径可以增大驱动单位体积流体的表面力。我们在5.6.3节中已经展示了用于驱动微流体流动的压电驱动技术的可行性。

3.8.2节中已经介绍了两种主要的电液动力学驱动方法(电渗和电泳)的工作原理。这些驱动技术已经广泛应用于生物技术和医药工业的微流体系统中。

6.8　热传输过程中的缩比特性

对于很多微系统来说，热传输的设计是一个重要的组成部分。在大多数情况下，微系统中的热传输采用传导和对流的模式。在某些特殊的情况下，热传输也采用辐射的模式，例如在微系统的一些制造技术中涉及到的激光处理。有关固体和流体中热传导和热对流的公式已经在第5章的第二部分中给出。本节将概述这两种热传输模式的缩比特性，并给出其在微米

尺度的缩比法则。第12章中将给出当器件中的部件尺寸进入到亚微米和纳米尺度时修正的缩比法则，此时必须考虑固体材料的热物理性质随尺寸的变化。除了尺寸参数之外，这些性质也应该包含在缩比法则中。

6.8.1 热传导过程中的缩比特性

热通量的缩比特性 固体材料的热传导特性由傅里叶定律给出，式(5.28)是其一般的通用形式。对于沿着 x 坐标方向的一维热传导来说，则有：

$$q_x = -k\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x}$$

式中，q_x是沿着 x 坐标方向的热通量，k 是固体材料的热导率，$T(x, y, z, t)$是固体材料在直角坐标系下时刻为 t 时的温度场。一个更为一般的固体热传导速率的表达式为：

$$Q = qA = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{6.27}$$

从式(6.27)很容易看到，对于介观和宏观尺度的固体材料来说，热传导的缩比法则表现为：

$$Q \propto (l^2)(l^{-1}) = (l^1) \tag{6.28}$$

从这个简单的缩比法则中不难看出，固体尺寸的减小将导致其中总的热流量的减小。

介观和微观尺度固体热传导效应的缩比特性 在瞬态热传导分析中，经常使用一个称作傅里叶数的无量纲数 Fo 来确定时间增量。Fo 的定义为：

$$\text{Fo} = \frac{\alpha t}{L^2} \tag{6.29}$$

式中，α 是由式(5.32)定义的材料热扩散率，t 是热流通过特征长度 L 所需的时间。

傅里叶数的物理意义是通过热传导的热量转移速率与系统中的能量存储速率之比[Kreith 和 Bohn, 1997]。通过重新改写式(6.29)，可以获得固体中热传导时间的缩比法则为：

$$t = \frac{\text{Fo}}{\alpha}L^2 \propto (l^2) \tag{6.30}$$

在式(6.30)中我们规定 Fo 和 α 均为常数。

例题6.6 当固体的尺寸减小为原来的十分之一时，试估算总的热流变化以及完成热传导所需的时间。

解答：利用式(6.28)和式(6.30)给出的缩比法则，可以估算出当固体的尺寸减小为原来的十分之一(1/10)时，总的热流也将减小为原来的十分之一，而完成热传导所需的时间则减小为原来的百分之一($1/10^2$)。

6.8.2 热对流中的缩比特性

从图5.22中已经看到，在固体与流体的分界面处存在着一个边界层。流体中的热传输方式是以对流的模式进行的，它由牛顿冷却定律描述，其表达式为式(5.33)，更为普遍的形式则为：

$$Q = qA = hA\,\Delta T \tag{6.31}$$

式中，Q 是流体中两点之间的热流总量，q 是对应的热通量，A 是热流通过的截面积，h 是传热系数，ΔT 是两点之间的温差。

正如 5.7.4 节中所述，传热系数 h 主要取决于流体的速度，它在热流的缩比过程中并不是很重要。因此根据式(6.31)，热流总量主要取决于横截面积 A，而截面积 A 的阶次为 l^2。因此我们可以得到流体在介观和微观范围内通过对流热传输的缩比特性为 $Q\propto(l^2)$。

在亚微米尺度，流体热对流的缩比特性并不是像上面描述的那样简单。我们将在第 12 章中介绍气体热传输的缩比特性。

本章习题

1. 在微型化过程中应用缩比法则是为了评价________对微型化产品的影响。
   (1)物理效应；(2)经济效应；(3)市场效应
2. 缩比法则是由________导出的。
   (1)设计工程师的经验；(2)物理定律；(3)市场需求
3. 几何尺寸的缩小对于微型化 MEMS 产品的________是至关重要的。
   (1)移动部件；(2)传感部件；(3)整体尺寸
4. Trimmer 力缩比矢量用于评价与________相关的微型化。
   (1)固体中的热流；(2)流体流动；(3)MEMS 设计中的刚体动力学
5. 对于诸如表面积-体积缩比这样的一阶缩比，加速度的变化是________。
   (1)线性的；(2)平方的；(3)立方的
6. 在微致动应用中，静电力优于电磁力的原因在于静电力的缩比特性________电磁力。
   (1)优于；(2)不如；(3)基本上等同于
7. 电磁力的缩比特性比静电力差________个数量级。
   (1)2；(2)3；(3)4
8. 小尺寸系统中电阻引起的功率损耗与宏观系统相比________。
   (1)更为严重；(2)不太严重；(3)基本相同
9. 流体流过微小圆形导管的压降________流过大导管的压降。
   (1)远大于；(2)基本等同于；(3)远小于
10. 流体在微小圆形导管中的体积流量________在大导管中的体积流量。
   (1)远大于；(2)基本等同于；(3)远小于
11. 流体在毛细管中流动时，表面张力效应会使得其压降________在中等尺度导管中流动的情形。
   (1)远大于；(2)基本等同于；(3)远小于
12. 流体在毛细管中流动时，表面张力效应会使得其体积流量________在中等尺度导管中流动的情形。
   (1)远大于；(2)基本等同于；(3)远小于
13. 尺寸较小的固体材料中的热流速度________尺寸较大的固体材料中的热流速度。
   (1)大于；(2)基本等同于；(3)小于
14. 当固体材料的尺寸减小为原来的十分之一时，该固体材料中总的热流将减小为原来的________。
   (1)十分之一；(2)百分之一；(3)千分之一
15. 当流体的相关尺寸减小为原来的十分之一时，该流体中总的热流将减小为原来的________。
   (1)十分之一；(2)百分之一；(3)千分之一

第 7 章 用于 MEMS 和微系统的材料

7.1 引言

在第 1 章中，我们认为当前用于制造各种 MEMS 和微系统产品的工艺技术与微电子技术是不可区分的。微电子工艺技术与微系统制造技术之间的这种紧密联系经常误导工程师们产生这样的错觉，即认为这二者之间是可以相互交换的。当前确实有很多微系统的制造技术是与微电子制造技术密切相关的，然而，微系统的设计及其封装技术则与微电子工艺技术有很大的不同。许多微系统中都会使用硅和砷化镓(GaAs)等微电子材料来制作传感和致动元件，之所以会选择这些材料，主要是因为它们来源丰富，并且它们的微加工和封装技术可以在微电子工艺技术的基础上很方便地建立起来。当然也有很多其他材料可以用于 MEMS 和微系统产品，例如石英、派热克斯玻璃、聚合物、塑料以及陶瓷等，但是这些材料却很少用于微电子工艺技术中。对于采用 LIGA 工艺制造的微系统来说，塑料和聚合物也将被广泛地使用，这一部分内容将在第 9 章中介绍。

7.2 衬底和晶圆片

在微电子学领域频繁使用的"衬底"一词是指在其上可以完成各种微制造工艺的一个平坦的宏观物体[Ruska, 1987]。在微系统中，衬底的使用还有其他的目的：它除了支撑将机械作用转换为电信号输出或者反之的转换器之外，其本身还可以作为信号转换器使用。例如，在第 2 章中我们曾经看到，将所受压力转换为薄膜偏转的压力传感器，其中的薄膜就是从硅衬底上切割下来的一个硅芯片上的组成单元。同样，对于微致动器来说，其中的执行部件(例如微加速度计中的微硅梁)也称为衬底。

在半导体中，衬底是从所谓的大块晶圆片上切割下来的单晶片。晶圆片可以是硅或其他单晶材料，例如石英或砷化镓等。然而，微系统中的衬底有些不同。通常有两种衬底材料可以用于微系统中，它们分别是(1)有源衬底材料和(2)无源衬底材料，下面将分别对其进行详细介绍。

表 7.1 给出了一组按照绝缘体(或电介质)、半导体和导体进行分类的材料[Sze, 1985]。在上述参考文献中，将电阻率 $\rho \geq 10^8\ \Omega \cdot cm$ 的材料划分为绝缘体；把电阻率介于 $10^{-3}\ \Omega \cdot cm < \rho < 10^8\ \Omega \cdot cm$ 的材料划分为半导体；而把电阻率 $\rho < 10^{-3}\ \Omega \cdot cm$ 的材料划分为导体。我们将会发现通常用于 MEMS 的这些衬底材料如硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)都属于半导体材料的范畴。在微电子学和微系统领域使用这些半导体材料作为主要衬底材料的一个重要原因，是这些材料可以根据应用的需求既能够用作导体也可以用作绝缘体。事实上，采用第 3 章中介绍的掺杂技术就可以将常用的半导体材料硅转变为导电材料，其方法是在硅材料中掺杂其他外来的原子从而形成 P 型硅或 N 型硅。所有的半导体材料都可以进行这样的掺杂。使用半导体材料的另一个原因是这些材料的制作工艺(例如刻蚀和薄膜淀积)及其所使用的工艺设备都已经发展得很成熟了。

表 7.1　绝缘体、半导体和导体电阻率的典型值

材料	近似电阻率 ρ(Ω·cm)	分类
银(Ag)	10^{-6}	导体
铜(Cu)	$10^{-5.8}$	
铝(Al)	$10^{-5.5}$	
铂(Pt)	10^{-5}	
锗(Ge)	$10^{-3} \sim 10^{1.5}$	半导体
硅(Si)	$10^{-3} \sim 10^{4.5}$	
砷化镓(GaAs)	$10^{-3} \sim 10^{8}$	
磷化镓(GaP)	$10^{-2} \sim 10^{6.5}$	
氧	10^{9}	绝缘体
玻璃	$10^{10.5}$	
镍(Ni)(纯态)	10^{13}	
金刚石	10^{14}	
石英(熔融)	10^{18}	

在文献[Madou, 1997]中给出了一个可以帮助设计师选择微系统衬底材料的考虑因素列表。

7.3　有源衬底材料

有源衬底材料主要用于微系统中的传感器和致动器(如图 1.5 所示)以及其他 MEMS 部件(如图 1.7 所示)。应用于微系统中的典型有源衬底材料包括硅、砷化镓、锗和石英。从表 7.1 中可知，除了石英之外，所有其他材料都属于半导体材料。这些衬底材料基本上都是具有四面体原子价键结构的立方晶格[Sze, 1985]。选择这些材料作为有源衬底材料主要是因为它们空间尺寸的稳定性，对于环境条件相对来说不是很敏感。空间尺寸的稳定性是高精度传感器和致动器的一个关键要求。

根据元素周期表(如图 3.3 所示)，半导体材料每个原子的外层轨道上有 4 个电子。每个原子也和它邻近的 4 个原子共享这 4 个外层电子。相邻原子核对共享电子的吸引力将不同的原子联系在一起。如 3.5 节中所述，可以通过掺杂其他的外来原子来改变半导体材料的导电性。

7.4　作为衬底材料的硅

7.4.1　用于 MEMS 的理想衬底

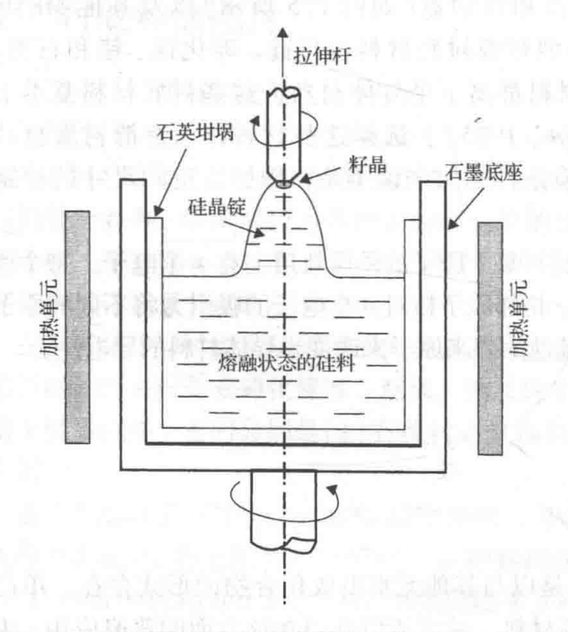
硅是地球上最丰富的材料，但是它几乎总是以与其他元素组成化合物的形式存在。单晶硅是最广泛用于各种 MEMS 和微系统中的衬底材料。硅之所以获得在这方面的普遍应用，主要是因为以下几点原因：

1. 硅的机械性能稳定，并且可以和电子器件集成在同一块衬底材料上。用于信号转换的电子器件，例如 P 型或 N 型压阻元件，也很容易集成到硅衬底上。
2. 硅是一种近乎理想的结构材料。它与钢具有几乎相同的杨氏模量(大约为 2×10^5 MPa)，但是却又和铝一样轻，其质量密度只有大约 2.3 g/cm^3。具有较高杨氏模量的材料可以更好地保持外加载荷与所产生形变之间的线性关系。

3. 硅的熔点为1400℃左右，大约是铝的2倍。较高的熔点使得硅材料即使在高温情况下也能保持其几何尺寸的稳定。
4. 硅的热膨胀系数大约只有钢的八分之一(1/8)，不到铝的十分之一(1/10)。
5. 最重要的是，硅从本质上说没有机械迟滞，因此它是一种理想的传感器和致动器的候选材料。而且，硅晶圆片非常平整，因此可以在其上制作各种涂层或者淀积额外的薄膜层来形成微几何结构或者导电层。
6. 与其他衬底材料相比，硅衬底在设计和制造中具有更大的灵活性。硅衬底的加工处理和制造工艺技术目前已经非常成熟了。

7.4.2　单晶硅和晶圆片

要利用硅作为衬底材料，首先必须获得纯的单晶纯。在已经开发出的几种生产纯单晶硅的方法中，切克劳斯基(CZ)方法是目前最常用的一种方法。粗加工的硅材料大多以石英砂的形式存在，用碳(煤炭、焦炭、木柴等)将粗加工的硅材料在石英坩埚中熔化，坩埚放在高温炉上加热，如图7.1所示[Ruska, 1987]。将一个"籽晶"放在拉伸杆的尖端处，使其与熔化的硅料接触从而生长出更大的晶体。拉伸杆随着熔融状态的硅料在籽晶上的不断沉积而缓慢地向上拉。随着拉伸杆的上拉，沉积的熔融硅料逐渐冷凝，由此形成了一个几英尺长的腊肠状的单晶硅锭。图7.2所示就是采用这种方法生产的一种单晶硅锭。这种单晶硅锭的直径一般在100～300 mm之间。



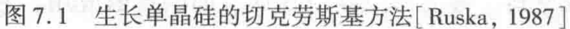


图7.1　生长单晶硅的切克劳斯基方法[Ruska, 1987]

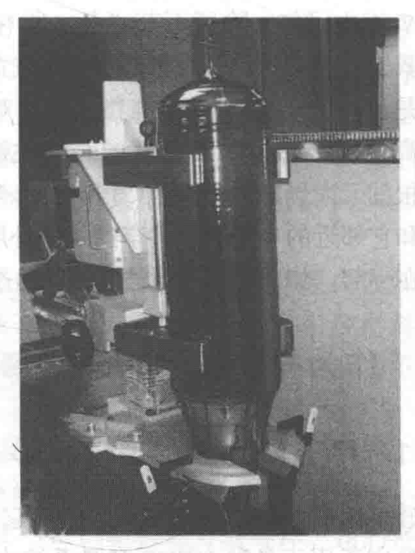


图7.2　在一个材料夹持设备上冷却的直径为300 mm的单晶硅锭(经位于St. Peters, MO的MEMC电子材料公司许可使用)

将利用CZ法生产的硅晶锭的外表面打磨成理想的圆柱形，然后用精密的金刚石锯将其切割成所需厚度的薄晶片，再对这些薄晶片进行化学研磨抛光，最终形成所需的成品晶圆片。

熔融硅料中的主要材料是氧化硅和碳化硅。这些材料在高温下发生化学反应，从而生产出纯硅和一些其他的气态副产品，其化学反应方程式为：

$$SiC + SiO_2 \rightarrow Si + CO + SiO$$

上述反应中生成的气体就释放到大气中，而液态的硅则被留下来固化成纯硅。采用这种方法生产的圆柱形纯单晶硅锭有 3 种标准尺寸：其直径分别为 100 mm(4 英寸)、150 mm(6 英寸)和 200 mm(8 英寸)。还有一种更大尺寸的单晶硅锭，其直径为 300 mm(12 英寸)，属于最新增加的一种标准晶圆片尺寸。目前工业化标准晶圆片的直径和厚度分别为：

直径 100 mm(4 英寸) × 厚 500 μm；
直径 150 mm(6 英寸) × 厚 750 μm；
直径 200 mm(8 英寸) × 厚 1 mm；
直径 300 mm(12 英寸) × 厚 775 μm。

从图 7.3 中可以看出直径 200 mm 和直径 300 mm 硅晶圆片的大小差别。直径 300 mm 硅晶圆片的面积是直径 200 mm 硅晶圆片的 2.25 倍，这样就可以在一块晶圆片上容纳更多的衬底，因而具有更大的经济优势。

正如在 4.3.6 节介绍的谐振频率压力传感器以及在 2.2.4 节介绍的硅太阳能光伏电池中那样，硅衬底中的某些特定区域甚至整个衬底区域往往都要求带电。因此，经常需要对整个衬底晶圆片进行 P 型或 N 型掺杂。3.5 节中介绍的 P 型杂质和 N 型杂质可以采用离子注入或扩散的方法引入到衬底中，这些工艺方法将在第 8 章中详细介绍。硅中常用的 N 型掺杂剂为磷、砷和锑，而常用的 P 型掺杂剂则为硼。

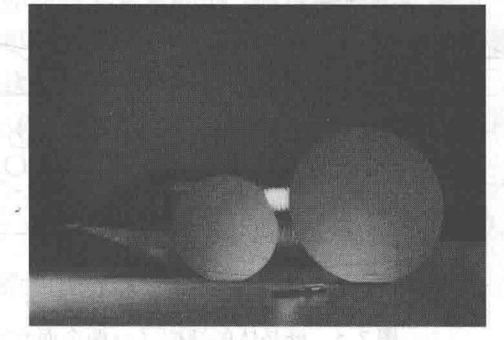


图 7.3　直径 200 mm 和直径 300 mm 晶圆片的大小差别(经位于 St. Peters, MO 的 MEMC 电子材料公司许可使用)

7.4.3　晶体结构

如图 3.2(b)所示，一个硅原子周围最外层的轨道上具有 4 个电子。原子最外层轨道上的这些电子通常称为价电子。大量硅原子就是通过价电子之间的共价键相互连接在一起，从而形成一个整块晶体的。每一个硅原子通常与其最近邻的 4 个硅原子分别以共价键的形式共用一个价电子，所谓共价键也就是原子之间以共用电子的方式相互连接在一起的结果。因此所形成固体的基本单元包含 5 个硅原子，即 1 个原始的硅原子外加 4 个与其共用价电子的硅原子。硅晶体就是由一系列这种 5 个硅原子组成的基本单元规则排列构成的晶体材料，这种规则的、固定排列的硅原子通常称为晶格阵列。

硅原子晶格阵列的几何结构并不是均匀分布的，它具有一种称为面心立方(FCC)晶胞的排列结构，如图 7.4 所示。晶胞由处于固定位置的原子组成，图中假想的线条所定义的区域就称为晶格。图中构成一个立方晶胞边长的尺寸 b 称为晶格常数。在一个典型的面心立方晶体中，原子位于立方晶格结构的 8 个顶角和 6 个侧面的中心。在图 7.4 中，我们将可以看见的原子显示为黑色，而看不见或隐藏的原子则显示为灰色。对于硅晶体来说，晶格常数 $b =$ 0.543 nm。在面心立方晶格中，每个原子与周围最近邻的 12 个原子连接在一起。

然而，硅的晶体结构比图 7.4 所示的常规面心立方结构还要更为复杂一些。可以考虑两个面心立方结构相互贯穿在一起的结果，如图 7.5(a)中的面心立方 A 和面心立方 B 所示

[Angell 等人, 1983]。因此硅晶体中还要包含额外的4个硅原子,如图7.5(b)所示。

图7.6展示了硅晶体结构的三维模型。仔细观察这个结构可以发现,4个额外的硅原子(即图7.6中的白球)在面心立方晶体内部构成了一个金刚石晶格类型中的子立方晶胞,如图7.7所示[Ruska, 1987]。可见一个硅晶体的晶胞中包含了8个原子①,其中8个原子在顶角位置(等效为1个原子),6个在面上(等效为3个原子),还有4个在内部。因此许多人也将硅的晶体结构看成是立方晶格间距为0.543 nm的金刚石晶格[Kwok, 1997]。

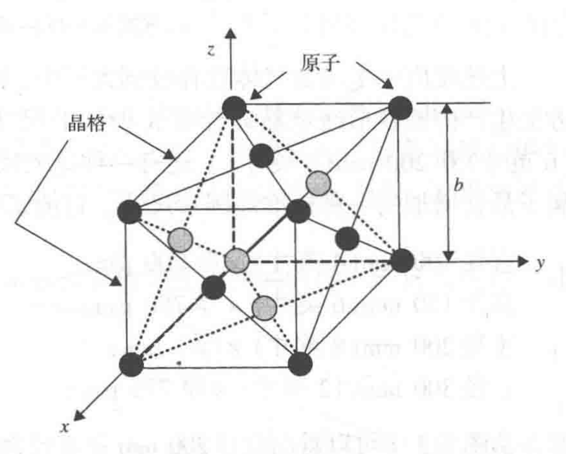
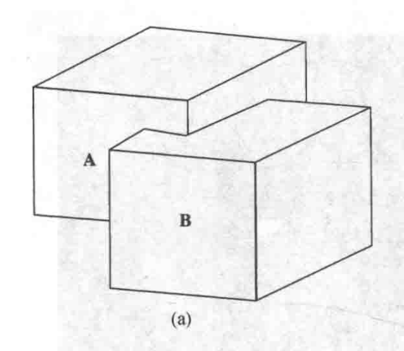


图7.4 典型的面心立方晶胞



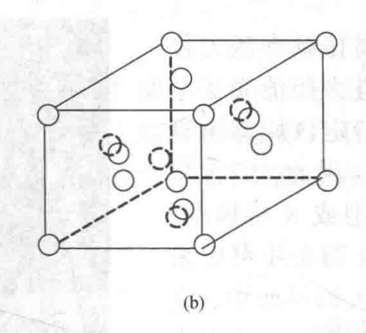
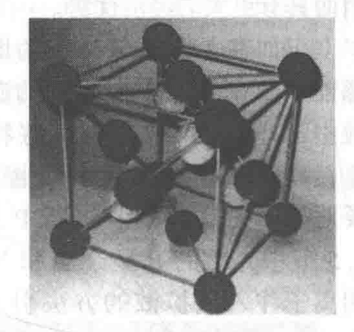
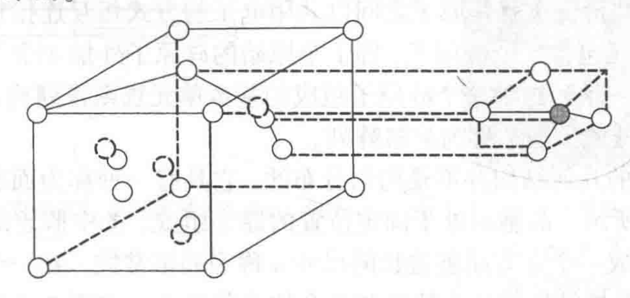


图7.5 硅晶体的结构:(a)两个面心立方晶体的合并;(b)合并后形成的晶体结构


图7.6 硅晶体结构的图片

在金刚石的子晶胞中,相邻原子之间的距离为0.235 nm[Bryzek 等人, 1991; Sze, 1985; Ruska, 1987],4个等间距的最近邻原子位于一个正四面体的4个顶角位置,由此构成了金刚石晶格,如图7.7中的内嵌图所示。我们也可以把硅晶体看成是立方体重复形成的叠层结构,每个立方体在其每个顶角和每个面心处都有一个原子(面心立方晶体结构)。在大块的硅单晶锭中,这些立方体与相邻的4个立方体之间是紧密连接在一起的,而硅晶圆片则是从这些单晶硅锭上切割下来的。


图7.7 硅晶体上金刚石晶格结构中的子立方晶胞

由于晶格中原子之间的非对称分布和非均匀间距,单晶硅材料的热物理特性和机械特性

① 原书为18个原子,有误。——译者注

都是各向异性的，在对硅材料进行加工和处理的过程中必须充分考虑这个特点。通过使用密勒指数，我们可以更好地反映这些与晶格方向有关的材料特性[Ruska，1987；Sze，1985]。

例题 7.1　估算每立方厘米纯硅晶体中包含的硅原子数。

解答：由于硅的晶格常数 $b = 0.543\ \text{nm} = 0.543 \times 10^{-9}\ \text{m}$，且在每个独立的晶胞中含有 18 个硅原子，因此每立方厘米硅晶体中包含的硅原子数为（1 cm = 0.01 m）：

$$N = \left(\frac{V}{v}\right)n = \left(\frac{0.01}{0.543 \times 10^{-9}}\right)^3 \times 18 = 1.12 \times 10^{23}\ \text{原子/cm}^3$$

在上面的计算中，V 和 v 分别代表题中所给的每立方厘米硅体积和单个硅晶胞的体积；n 则是单个硅晶胞中包含的硅原子数。①

7.4.4　密勒指数

由于硅晶体中原子分布的不对称性，晶体表现出的材料特性也是不均匀的。能够在晶体中根据其特定的性质确定晶体材料的主要方向和晶面是非常重要的，确定晶面和晶向的一种常用方法是采用所谓的密勒指数。在立方晶系材料中，应用密勒指数来确定晶体材料的晶面是一种非常有效的方法。下面我们将简单地概述这种密勒指数的原理。

首先来看在直角坐标系 x-y-z 中定义的空间中任一平面上的一点 $P(x, y, z)$。该点 P 所在平面满足的方程为：

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1 \tag{7.1}$$

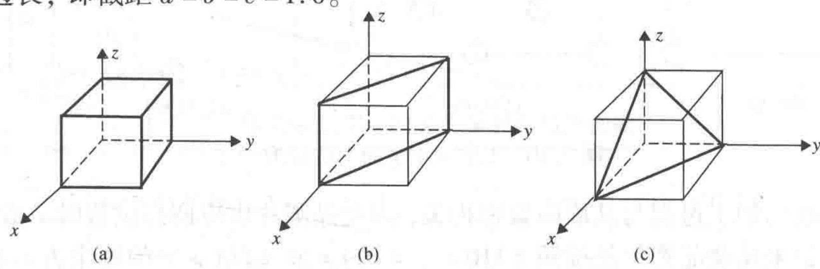
式中，a、b 和 c 分别是该平面在 x、y 和 z 轴上截距的坐标。

式(7.1)还可以表示为另外一种形式，即：

$$hx + ky + mz = 1 \tag{7.2}$$

很显然，式(7.2)中的 $h = 1/a$，$k = 1/b$，$m = 1/c$。

如果用符号(hkm)来表示上述平面，用符号 $<hkm>$ 来表示与该平面(hkm)相垂直的方向，那么我们就可以表示出图 7.8 所示的立方晶体中的 3 个平面。我们假定该立方结构具有单位长度的边长，即截距 $a = b = c = 1.0$。



7.8　立方硅晶体中平面的表示方法：(a)垂直面；(b)对角面；(c)倾斜面

---

① 原文分析有误，例题 7.1 正确的解答如下：

解答：由于硅的晶格常数 $b = 0.543\ \text{nm} = 0.543 \times 10^{-9}\ \text{m}$，且在每个独立的晶胞中含有 8 个硅原子，因此每立方厘米硅晶体中包含的硅原子数为（1 cm = 0.01 m）：

$$N = \left(\frac{V}{v}\right)n = \left(\frac{0.01}{0.543 \times 10^{-9}}\right)^3 \times 8 = 5.0 \times 10^{22}\ \text{原子/cm}^3$$

在上面的计算中，V 和 v 分别代表题中所给的每立方厘米硅体积和单个硅晶胞的体积；n 则是单个硅晶胞中包含的硅原子数。——译者注。

利用式(7.1)和式(7.2)，我们可以将图 7.8 中的各个平面分别表示如下：

图 7.8(a)中的顶面：(001)；

图 7.8(a)中的右面：(010)；

图 7.8(a)中的前面：(100)；

图 7.8(b)中的对角面：(110)；

图 7.8(c)中的倾斜面：(111)。

这些平面的方向可以分别用 < 100 >、< 111 > 等符号来表示，其中 < 100 > 方向与(100)平面相垂直，而 < 111 > 方向则与(111)平面相垂直，依次类推。图 7.9 展示了单晶硅材料中一个晶胞的三个晶面及其方向。

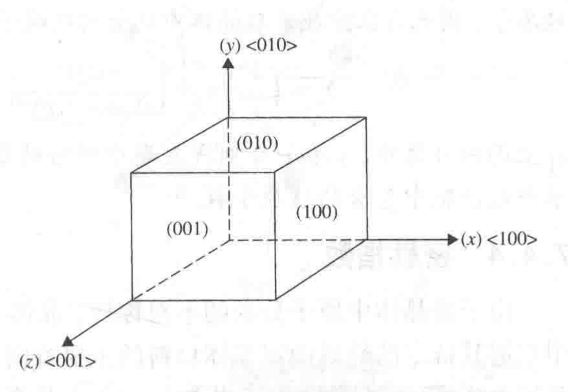


图 7.9　硅晶体结构及其晶面和晶向

在(100)、(110)和(111)这 3 个主平面上硅原子的分布如图 7.10 所示。图中用空心圆圈表示的原子都位于立方体的顶角处，而用灰色实线圆圈表示的原子则位于面心处，采用灰色虚线圆圈表示的原子则位于晶胞的内部。

如图 7.6 和图 7.10 所示，(111)平面上相邻原子之间的晶格距离是最短的。这个较短的相邻原子间晶格距离可以使该平面上不同原子之间的吸引力大于另外两个平面上的吸引力。另外，该平面上还包含位于晶胞面心处的 4 个原子中的 3 个(灰色)。因此在该平面上晶体的生长速度是最慢的，而且很多工艺制造过程，例如我们将在第 8 章和第 9 章中学习的刻蚀工艺，也是进行得最慢的。

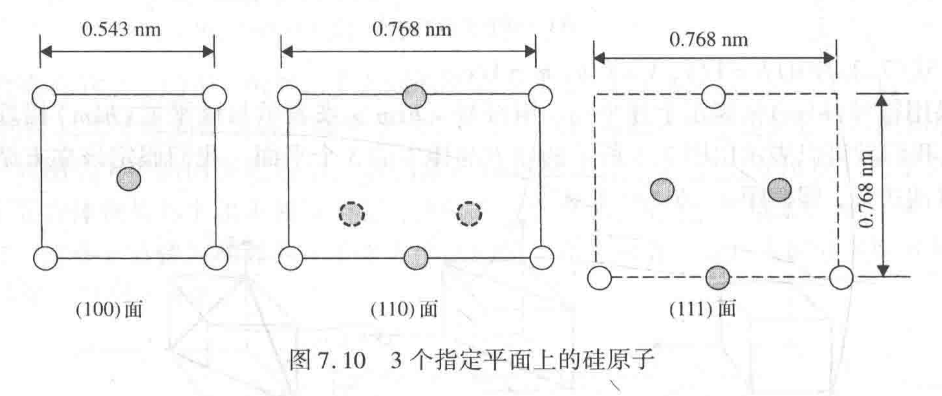


图 7.10　3 个指定平面上的硅原子

由于硅衬底的加工过程与其取向紧密相关，因此晶圆片供应商在供货时一般利用图 7.11 所示的平边标识来反映晶圆片是按照 < 110 >、< 100 > 或 < 111 > 中的哪个方向进行切割的。硅晶锭的边缘可以被磨成具有单一的主平边，在某些情况下，也可以增加一个额外的副平边。因此从这些硅单晶锭上切割下来的晶圆片就可能包含一个或两个平边，如图 7.11 所示。主平边通常用于表明晶圆片的晶体结构取向，而副平边则用来表明晶圆片的掺杂类型。例如，图 7.11(a)表示了一个垂直于 < 111 > 晶向的 P 型硅晶体的晶面。而在图 7.11(b)中具有与主平边成 45°角的副平边则表明该晶圆片是 N 型掺杂的。晶圆片中，其他形式的平边排列情况所表示的含义可以参考相关文献[van Zant，1997；Madou，1997]。

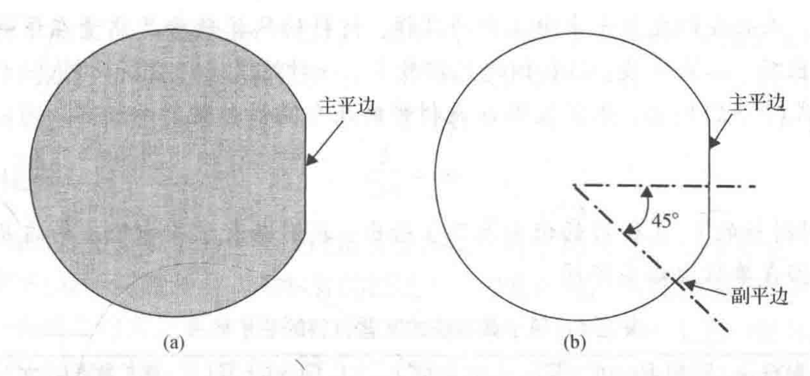


图 7.11　硅晶圆片上的主平边和副平边：(a)N 型；(b)P 型

7.4.5　硅的机械性能

在微电子学领域，硅主要用作集成电路的载体。而在微系统领域，硅则是用作传感器和致动器的主要候选材料，也可以用作微流体器件的衬底。用于在硅芯片上制作集成电路的技术也同样可以用于微系统中。但是硅作为通用的具有三维几何结构器件的材料，除了要满足诸如集成在其上的压敏电阻等电子器件的要求之外，还必须能够承受非常严重的机械载荷与热载荷。因此作为一种结构材料，硅的机械性能是有必要得到充分了解和认识的。

在 800℃以下，硅基本上是一种无塑性和蠕变的弹性材料，在各种可能的环境中它也几乎不存在疲劳失效。这些独特的性质使其成为微系统中一种理想的传感和致动材料。但硅也是一种易碎的脆性材料，因此在设计承受具有一定冲击载荷的微系统时，必须考虑硅的这种不理想的脆性断裂行为。硅衬底的另一个缺点是它的各向异性特性。由于需要考虑与方向相关的各种机械力学特性，这就使得对硅结构进行精确的应力分析变得非常冗长复杂。表 7.2 给出了硅晶体在不同方向上的杨氏弹性模量和剪切弹性模量[Madou，1997]。对于微系统设计的大多数情形来说，可以使用表 7.3 给出的有关硅、硅的化合物以及其他有源衬底材料的性能参数。

表 7.2　硅晶体在不同方向上的杨氏弹性模量和剪切弹性模量

特定晶向的密勒指数	杨氏模量 E(GPa)	剪切模量 G(GPa)
<100>	129.5	79.0
<110>	168.0	61.7
<111>	186.5	57.5

表 7.3　MEMS 常用材料的力学和热物理性能

材料	σ_y (10^9N/m^2)	E (10^{11}N/m^2)	ρ (g/cm^3)	C (J/g·℃)	k (W/cm·℃)	α (10^{-6}℃)	T_M (℃)
Si	7.00	1.90	2.30	0.70	1.57	2.33	1400
SiC	21.00	7.00	3.20	0.67	3.50	3.30	2300
Si_3N_4	14.00	3.85	3.10	0.69	0.19	0.80	1930
SiO_2	8.40	0.73	2.27	1.00	0.014	0.50	1700
铝	0.17	0.70	2.70	0.942	2.36	25	660
不锈钢	2.10	2.00	7.90	0.47	0.329	17.30	1500
铜	0.07	0.11	8.9	0.386	3.93	16.56	1080
GaAs	2.70	0.75	5.30	0.35	0.50	6.86	1238
Ge		1.03	5.32	0.31	0.60	5.80	937
石英	0.5~0.7	0.76~0.97	2.66	0.82~1.2	0.067~0.12	7.10	1710

注：半导体材料参数来源于 *M. Madou* 的 *Fundamentals of Microfabrication*(《微加工基础》)，CRC Press，Boca Raton，FL，1997.
符号说明：σ_y = 屈服强度，E = 杨氏模量，ρ = 质量密度，C = 比热容，k = 热导率，α = 热膨胀系数，T_M = 熔点。

例题7.2 正如我们在第5章中指出的那样，材料的热扩散率是热量在该材料中流动快慢的量度。列出硅、二氧化硅、铝和铜的热扩散率，并对结果进行分析比较。

解答：如式(5.32)所示，热扩散率 α 是材料的几个特性参数的函数：

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}$$

式中，4种不同材料的 k、ρ 和 C 的值由表7.3给出，我们在表7.4中给出的这几个参数值与表7.3中的数据在单位上略有不同。

表7.4 用于微系统的某些材料的热扩散率

材料	K(J/s·m·℃)	ρ(g/m³)	C(J/g·℃)	热扩散率 α(m²/s)
Si	157	2.3×10^6	0.7	97.52×10^{-6}
SiO_2	1.4	2.27×10^6	1.0	0.62×10^{-6}
铝	236	2.7×10^6	0.94	93×10^{-6}
铜	393	8.9×10^6	0.386	114.4×10^{-6}

将表7.4中左边3列给出的材料特性参数代入式(5.32)，可以计算求得这几种材料的热扩散率，如表7.4中最右边一列所示。毫无疑问，铜的热扩散率最高，而硅和铝的热扩散率在数值上比较接近。从本题中我们可以获得的一个有用信息是，硅和铝的导热速度要比二氧化硅快150倍以上。因此可以得出这样的结论，即铜膜是微系统中最好的快速导热材料，而二氧化硅则可以用作有效的热障材料。正如第2章中所述，具有较高热扩散率的材料特别适合应用于热力驱动的微致动器中。

7.5 硅的化合物

二氧化硅(SiO_2)、碳化硅(SiC)和氮化硅(Si_3N_4)是微系统中常用的3种硅的化合物。我们接下来将简要介绍它们在微系统中所扮演的角色。

7.5.1 二氧化硅

二氧化硅在微系统中有3个主要用途：(1)作为热和电的绝缘体(可以参见表7.1，二氧化硅具有较高的电阻率)；(2)作为硅衬底刻蚀的掩模；(3)作为表面微加工技术中的牺牲层，这一点我们将在第9章中介绍。二氧化硅比硅具有更强的抵抗大多数刻蚀剂的能力。表7.5列出了二氧化硅的一些重要性能参数。

表7.5 二氧化硅的性能参数

性能参数	数值
密度(g/cm³)	2.27
电阻率(Ω·cm)	$\geqslant10^{16}$
介电常数	3.9
熔点(℃)	~1700
比热容(J/g·℃)	1.0
热导率(W/cm·℃)	0.014
热膨胀系数(ppm/℃)	0.5

资料来源：[Ruska，1987]。

二氧化硅可通过在含有氧气的氧化剂中加热硅材料来形成，反应中可以通入水蒸气也可以不通入水蒸气，所发生的化学反应式分别为：

$$\text{对于不通入水蒸气的干法氧化：} Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \quad (7.3)$$

$$\text{对于通入水蒸气的湿法氧化：} Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2 \quad (7.4)$$

正如我们在第3章中所述，氧化工艺实际上也是一个扩散的过程。因此氧化速率也可以采用大多数扩散工艺中使用的类似技术来进行控制。对于温度为900℃的干氧氧化来说，在掺砷的N型硅中，氧化剂的典型扩散率为 4×10^{-19} cm²/s；而在掺硼的P型硅中，氧化剂的典

型扩散率则为 $3\times10^{-19}\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}$[Sze, 1985]。如果通入水蒸气，氧化反应的速度可以大大增加，因为高度活性的水分子可以增强氧化反应。和所有其他的扩散过程一样，掺杂剂在衬底材料中的扩散率是影响扩散工艺有效性的一个关键参数。

7.5.2　碳化硅

碳化硅(SiC)在微系统中的主要优点是其在高温条件下的尺寸稳定性和化学稳定性。甚至在极高的温度下，碳化硅对氧化也有很强的抵抗力。经常在 MEMS 器件表面沉积一层碳化硅薄膜以保护它们在极端的高温下不被破坏。另一个吸引人们在 MEMS 工艺中使用碳化硅的原因是，采用铝作为掩模的干法刻蚀(我们将在第 8 章和第 9 章中对其做介绍)可以很容易实现碳化硅薄膜的图形化，而图形化之后的碳化硅薄膜又可以在微加工过程中进一步用作下层硅衬底的钝化层(即保护层)，因为几种常用的腐蚀剂(例如 KOH 和 HF)都很难腐蚀碳化硅。

正如 7.4.2 节中所述，碳化硅是生产单晶硅锭过程中形成的一种副产物。由于硅存在于各种含碳的原材料中(例如煤炭、焦炭、木柴等)，在电弧炉中对这些材料进行高强度的加热将导致碳化硅沉积到坩埚的底部。碳化硅薄膜可以采用各种沉积技术来制备。表 7.3 中也给出了碳化硅的相关热物理性能参数。

7.5.3　氮化硅

氮化硅(Si_3N_4)具有许多吸引 MEMS 和微系统的优异特性。它可以有效地阻挡水汽和各种离子(如钠离子)的扩散；它具有超强的抗氧化和抗腐蚀的能力，这使得它特别适合于用作深刻蚀的掩模；氮化硅还可以用作光波导以及用作防止水和其他有毒流体进入衬底的密封材料；它也可以用作高强度的电气绝缘层和离子注入掩模。

氮化硅可以利用含硅的气体和氨气(NH_3)通过下述化学反应来制备：

$$3SiCl_2H_2 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 6HCl + 6H_2 \tag{7.5}$$

表 7.6 中选择性地列出了氮化硅材料的一些特性参数，其中的化学气相沉积工艺(包括低压化学气相沉积，即 LPCVD 工艺，以及等离子体增强化学气相沉积，即 PECVD 工艺)，我们将在第 8 章中详细介绍，有关氮化硅材料的其他特性参数可以参见表 7.3 中所列的数据。

表 7.6　氮化硅材料的一些特性参数

性能参数	LPCVD[a]	PECVD[b]
淀积温度(℃)	700 ~ 800	250 ~ 350
密度(g/cm^3)	2.9 ~ 3.2	2.4 ~ 2.8
薄膜质量	较好	较差
介电常数	6 ~ 7	6 ~ 9
电阻率(Ω·cm)	10^{16}	10^{6} ~ 10^{15}
折射率	2.01	1.8 ~ 2.5
氢原子百分比(%)	4 ~ 8	20 ~ 25
在浓 HF 中的腐蚀速率(Å/min)	200	—
在 BHF 中的腐蚀速率(Å/min)	5 ~ 10	—
泊松比	0.27	—
杨氏模量(GPa)	385	—
热膨胀系数(ppm/℃)	1.6	—

a. Low-pressure chemical vapor deposition，低压化学气相沉积。
b. Plasma-enhanced chemical vapor deposition，等离子体增强化学气相沉积。
资料来源：[Madou, 1997]。

7.5.4 多晶硅

多晶硅可以采用化学气相沉积(CVD)的方法淀积到硅衬底上，如图7.12所示，它已经成为表面微加工技术中的主要材料，我们将在第9章中详细介绍。

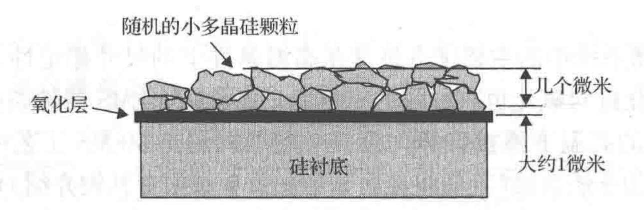


图7.12 淀积到硅衬底上的多晶硅

低压化学气相沉积(LPCVD)工艺经常用于在硅衬底上淀积多晶硅，该工艺的温度为600~650℃。多晶硅广泛应用于集成电路产业，主要用于制作电阻、晶体管的栅极以及薄膜晶体管等。多晶硅经过重掺杂(掺砷和磷用于N型，或者掺硼用于P型)之后可以大大降低其电阻率，因此可以用作导体和控制开关。因此它们是制作微电阻和简易欧姆接触的理想材料。掺杂的多晶硅圆片还是改进太阳能光伏电池转换效率的首选材料。表7.7给出了多晶硅和其他材料的一些关键特性参数的比较。多晶硅是具有随机尺寸和随机取向的单晶硅的集合，因而在热分析和结构分析时可以看作是各向同性材料。

表7.7 多晶硅和其他材料的机械性能参数比较

材料	杨氏模量(GPa)	泊松比	热膨胀系数(ppm/℃)
作为衬底			
硅	190	0.23	2.6
氧化铝	415	—	8.7
硅石	73	0.17	0.4
作为薄膜			
	160	0.23	2.8
多晶硅	70	0.2	0.35
热氧化 SiO_2	270	0.27	1.6
LPCVD SiO_2		—	2.3
PACVD SiO_2	70	0.35	25
铝	410	0.28	4.3
钨	3.2	0.42	20~70
聚酰亚胺			

资料来源：[Madou, 1977]。

7.6 硅压电电阻

压电电阻效应的定义为：固体在受到应力场作用时其电阻发生变化的现象。硅压电电阻目前已经被广泛应用于各种微传感器和致动器中。

我们在第3章以及7.4.2节中已经了解到，将硼掺杂到硅晶格中可以形成P型硅晶体，而掺杂砷或磷则可以形成N型硅晶体。无论是P型硅还是N型硅都表现出了优异的压电效应。查尔斯·史密斯(Charles Smith)在1954年就发现了P型硅和N型硅的压电电阻效应。

不论是 P 型硅还是 N 型硅，硅晶体各向异性的事实使得电阻的变化与外加应力场之间的关系变得更加复杂了，它们之间的关系可以表示为：

$$\{\Delta\mathbf{R}\} = [\pi]\{\sigma\} \tag{7.6}$$

式中，矢量 $\{\Delta\mathbf{R}\} = \{\Delta R_{xx} \quad \Delta R_{yy} \quad \Delta R_{zz} \quad \Delta R_{xy} \quad \Delta R_{xz} \quad \Delta R_{yz}\}^T$ 代表与应力分量 $\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{yz}\}^T$ 相对应的一个无穷小立方体压电电阻晶体单元上的电阻变化，如图 7.13 所示。在应力张量 $\{\sigma\}$ 的 6 个独立应力分量中，有 3 个是正应力分量，即 σ_{xx}、σ_{yy} 和 σ_{zz}，另外 3 个是切应力分量，即 σ_{xy}、σ_{xz} 和 σ_{yz}。方程(7.6)中的矩阵 $[\pi]$ 称为压电电阻系数矩阵，它具有下述形式：

$$[\pi] = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

从式(7.7)中可以看到，矩阵中只出现了 3 个系数 π_{11}、π_{12} 和 π_{44}。采用式(7.7)中合适的压电电阻系数来扩展式(7.6)给出的矩阵方程，可以得到下面的关系式：

$$\Delta R_{xx} = \pi_{11}\sigma_{xx} + \pi_{12}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$
$$\Delta R_{yy} = \pi_{11}\sigma_{yy} + \pi_{12}(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})$$
$$\Delta R_{zz} = \pi_{11}\sigma_{11} + \pi_{12}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$
$$\Delta R_{xy} = \pi_{44}\sigma_{xy}$$
$$\Delta R_{xz} = \pi_{44}\sigma_{xz}$$
$$\Delta R_{yz} = \pi_{44}\sigma_{yz}$$

很显然，系数 π_{11} 和 π_{12} 与正应力分量有关，而系数 π_{44} 则与切应力分量有关。

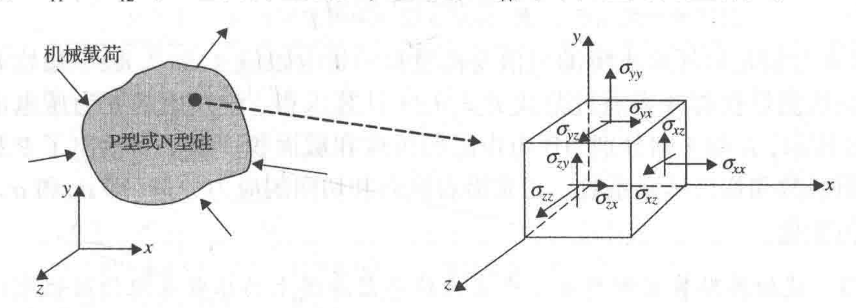


图 7.13 处于应力场中的硅压电电阻

这 3 个系数的实际值取决于压电电阻与硅晶格阵列之间的夹角。表 7.8 给出了室温下这些系数的数值。

表 7.8 室温下 <100> 晶向硅的电阻率和压电电阻系数

材料	电阻率(Ω·cm)	π_{11}	π_{12}	π_{44}
P 型硅	7.8	+6.6	-1.1	+138.1
N 型硅	11.7	-102.2	+53.4	-13.6

注：系数 π_{11}、π_{12} 和 π_{44} 的单位是 10^{-12} cm²/dyne(平方厘米/达因)，或者 10^{-11} m²/N(即 Pa^{-1})。

资料来源：[French 和 Evans, 1988]。

当然，方程(7.6)和图7.13所示的情况代表了三维几何结构压电电阻晶体的一般情形。而在几乎所有MEMS和微系统的应用场合，硅压电电阻都是以薄膜带状形式存在的，如图7.14所示。在这种情况下，我们只需考虑平面内沿着 x、y 方向上的应力即可。

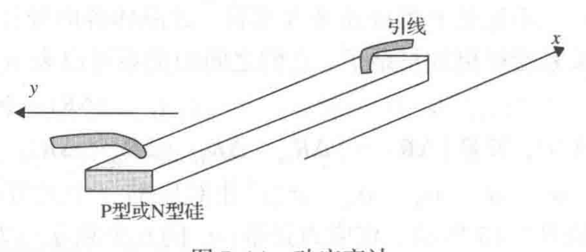


图7.14 硅应变计

从表7.8中看到，对于P型硅来说，最大压阻系数为$\pi_{44} = +138.1 \times 10^{-11}\ \mathrm{Pa}^{-1}$，而对于N型硅来说，最大压阻系数则为$\pi_{11} = -102.2 \times 10^{-11}\ \mathrm{Pa}^{-1}$。因此许多硅压电电阻都是由掺硼的P型材料组成的。表7.9给出了在不同晶面上制作的P型硅压电电阻的压阻系数[Bryzek等人，1991]。

表7.9 沿着不同晶向P型硅压电电阻的压阻系数

晶面	x方向取向	y方向取向	π_L	π_T
(100)	<111>	<211>	$+0.66\ \pi_{44}$	$-0.33\ \pi_{44}$
(100)	<110>	<100>	$+0.5\ \pi_{44}$	~0
(100)	<110>	<110>	$+0.5\ \pi_{44}$	$-0.5\ \pi_{44}$
(100)	<100>	<100>	$+0.02\ \pi_{44}$	$+0.02\ \pi_{44}$

资料来源：[Bryzek等人，1991]。

表7.9中π_L代表沿着纵向方向的压阻系数，即图7.14中的<x>方向；而π_T代表沿着切向方向的压阻系数，即图7.14中的<y>方向。

根据上面的分析，一个硅压电电阻计的电阻变化可以表示为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L \sigma_L + \pi_T \sigma_T \tag{7.8}$$

式中，ΔR和R分别是硅压电电阻的阻值变化量和初始电阻值。式(7.8)中初始电阻R的数值可以通过直接测量获得或者通过公式$R = \rho L/A$计算求得，公式中的ρ为压电电阻的电阻率，如图3.8所示，L和A则分别为压电电阻的长度和截面积。表7.9给出了P型硅压电电阻的纵向压阻系数和切向压阻系数。正是沿着纵向和切向的应力分量(即σ_L和σ_T)引起了压电电阻的阻值变化。

例题7.3 试估算贴装在例题4.4中压力传感器薄膜上的压电电阻的阻值变化。

解答：我们重新画出例题4.4中的示意图，如图7.15所示。图中，A、B、C和D是4个完全相同的扩散在硅膜上表面的压电电阻。电阻A和D主要承受垂直于水平边的横向应力分量σ_T；而电阻B和C则主要承受垂直于竖直边的纵向应力分量σ_L。

由于上表面承受均匀压力载荷的薄膜几何形状为正方形，因此垂直于所有边缘的弯矩在数值上是相等的，于是得到$\sigma_L = \sigma_T = \sigma_{\max} = 186.8\ \mathrm{MPa} = 186.8 \times 10^6\ \mathrm{Pa}$(由例题4.4中计算结果得出)。

我们假定薄膜位于(100)晶面，且纵向和横向应力均沿着<100>晶向(为什么?)。因此根据表7.9可以得到P型压电电阻的压阻系数为$\pi_L = \pi_T = 0.02\ \pi_{44}$，其中压阻系数$\pi_{44}$的值可以从表7.8中获得：$\pi_{44} = 138.1 \times 10^{-11}\ \mathrm{Pa}^{-1}$。

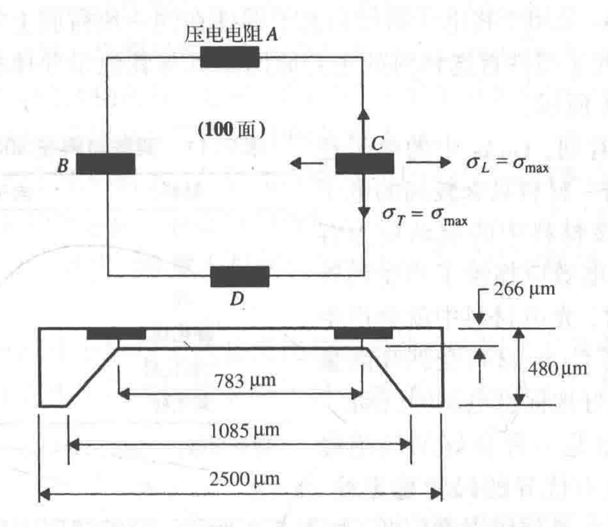


图7.15　位于压力传感器芯片上的压电电阻

最终可以估算出压电电阻的阻值变化为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L \sigma_L + \pi_T \sigma_T = 2 \times 0.02 \pi_{44} \sigma_{max} = 2 \times 0.02(138.1 \times 10^{-11})(186.8 \times 10^6)$$
$$= 0.010\ 32\ \Omega/\Omega$$

如果要求出电阻值的净变化量，还需要知道不受应力作用时电阻的长度以及电阻材料的电阻率(如图3.8中给出的结果)。

硅压电电阻的一个主要缺点是其压电电阻率对温度的强烈依赖关系。压电电阻对于外加应力的灵敏度随着温度的升高而迅速变差。表7.10给出了相对于室温下的压阻系数变化。

表7.10　硅压电电阻的电阻率及压电电阻率的温度依赖性

掺杂浓度 (10^{18}/cm^3)	P型TCR (%/℃)	P型TCP (%/℃)	N型TCR (%/℃)	N型TCP (%/℃)
5	0.0	-0.27	0.01	-0.28
10	0.01	-0.27	0.05	-0.27
30	0.06	-0.18	0.09	-0.18
100	0.17	-0.16	0.19	-0.12

注：TCR即电阻的温度系数，TCP即压电电阻率的温度系数。

资料来源：[French和Evans，1988]。

举例说来，如果P型硅压电电阻的掺杂浓度为10^{19}/cm^3，其压电电阻率的损失则为0.27%/℃。该压阻工作在120℃时，其压电电阻率系数的损失将达到(120－20)×0.27%＝27%。因此在设计一个信号调节系统时，必须考虑对这种损失进行适当的补偿。

压电电阻的掺杂浓度通常要求低于10^{19}/cm^3，这是因为超过这个掺杂浓度之后，压电电阻系数就会显著下降，同时还会引起反向击穿的问题。

7.7　砷化镓

砷化镓(GaAs)是一种半导体化合物材料，它是由等量的砷原子和镓原子所组成的。作为一种化合物材料，含有两种元素原子的砷化镓晶格结构更为复杂，因此其加工工艺也比硅

要更加困难。但是 GaAs 是用于将电子器件和光子器件在同一块衬底上实现单片集成的优异材料。GaAs 能够作为光子器件首选材料的主要原因是其与其他半导体材料相比具有极高的电子迁移率，如表 7.11 所示。

从表 7.11 中可以看到，GaAs 中的电子迁移率大约是硅中的 7 倍。材料具有较高的电子迁移率意味着电流在该材料中的流动更为容易。2.2.4 节介绍的光电效应描绘了当受到外来高能量光子的激发时，光电材料中就会产生相应的电流。可见，当 GaAs 材料受到高能量光源激发时，它能够更好地促进电流的流动。

表 7.11　某些材料在 300K 时的电子迁移率

材料	电子迁移率(m^2/V · s)
铝	0.00435
铜	0.00136
硅	0.145
砷化镓	0.850
二氧化硅	≈0
氮化硅	≈0

资料来源：[Fwok, 1997]。

砷化镓材料同时也是一种良好的热绝缘层，并且它在高温下具有优异的尺寸稳定性。砷化镓材料的不足之处是其屈服强度较低，如表 7.3 所示，它的屈服强度为 2700 MPa，仅为硅的 1/3。因此砷化镓很少被用作微系统的衬底材料。由于砷化镓材料在微电子工业中的应用相对比较少，因而其价格要比硅材料高得多。

除了表 7.3 中给出的砷化镓和硅材料在热物理性能参数方面的不同之外，表 7.12 对微系统中的这两种衬底材料进行了全面的比较。

表 7.12　砷化镓和硅在微加工技术中的比较

特性	砷化镓	硅
光电子学	非常好	不好
压电效应	有	无
压电系数(pN/℃)	2.6	0
热导率	比较低	比较高
价格	高	低
与其他衬底的键合	困难	相对容易
断裂情况	易碎，脆	易碎，硬
工作温度	高	低
最佳工作温度(℃)	460	300
物理稳定性	中等	非常好
硬度(GPa)	7	10
断裂强度(GPa)	2.7	6

资料来源：[Madou, 1997]。

7.8　石英

石英是由 SiO_2 构成的一种化合物。石英的一个单位晶胞呈四面体形状，其中三个氧原子分别位于四面体底部的三个顶点，一个硅原子位于四面体的另一个顶点，如图 7.16 所示。垂直于基面的轴称为 *Z* 轴。石英的晶体结构是由 6 个硅原子组成的圆环。

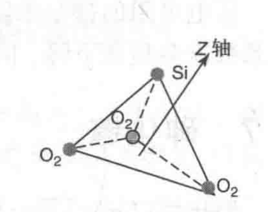


图 7.16　石英的晶胞结构

石英是制作传感器的理想材料，因为它在尺寸上的热稳定性是几乎绝对的。石英已经应用于市场中的很多压电器件中，这一点我

们将在 7.9 节中介绍。石英晶体的商业应用包括手表、电子滤波器以及谐振器等。石英是应用于微流体生物医学分析的理想材料。石英的价格不贵，由于它具有优异的电绝缘特性，因此非常适合应用于电泳流体的传输，正如我们在第 3 章和第 5 章中所介绍的那样。它对于紫外光也是透明的，因此经常用来探测流体中的各种成分。

石英材料的机械加工比较困难。尽管超声切割技术已经用来修整具有比较精密几何形状的石英材料，但是金刚石切削还是一种常用的石英加工方法。可以采用 HF/NH_4F 等化学腐蚀的方法将石英制成所需要的形状。商业上目前已经可以获得直径达到 75 mm、厚度为 100 μm 的石英晶圆片。

石英材料在几何尺寸上的稳定性甚至比硅还要高，特别是在高温情况下。虽然它的机械加工比较困难，但是其几何柔韧性要强于硅。表 7.13 列出了石英材料的一些关键性能参数。

表 7.13 石英的一些关键性能参数

性能参数	平行于 *Z* 轴的数值	垂直于 *Z* 轴的数值	温度相关性
热导率(cal/cm/s/℃)	29×10^{-3}	16×10^{-3}	随温度↓
介电常数	4.6	4.5	随温度↓
密度(kg/m^3)	2.66×10^3	2.66×10^3	
热膨胀系数(ppm/℃)	7.1	13.2	随温度↑
电阻率(Ω · cm)	0.1×10^{15}	20×10^{15}	随温度↓
断裂强度(GPa)	1.7	1.7	随温度↓
硬度(GPa)	12	12	

资料来源：[Madou, 1997]。

7.9 压电晶体

在 MEMS 和微系统中，最常用的一种非半导体材料就是压电晶体。压电晶体是固态的陶瓷化合物，当它的两个侧面受到外力作用时，就可以产生一定的电压。反过来，如果在晶体的两端加上电压，也可以改变晶体的形状。这种机械能与电信号(即电压)之间的相互转化过程如图 7.17 所示，这样一种独特的特性则称为压电效应。压电效应最早是由 Jacques 和 Pierre Curie 在 1880 年发现的，该效应存在于很多自然晶体中，如石英、电气石和酒石酸钾钠等，并且石英已经在机电换能器中应用很多年了。也有很多合成的晶体材料，如罗舍耳盐($NaKC_4H_4O_6-4H_2O$)、钛酸钡($BaTiO_3$)和锆钛酸铅(PZT)等。

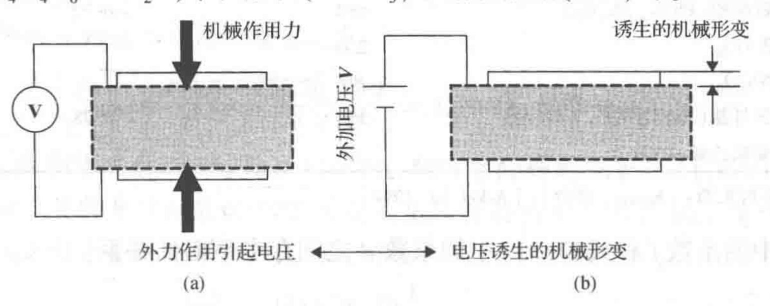


图 7.17 采用压电晶体实现机械能和电能的转换(引自[Kasap, 1997])：
(a)从机械能转换成电能；(b)从电能转换成机械能

具有压电效应的晶体，其结构上不存在对称中心。当有机械载荷施加到这种晶体上时，每个单元晶胞中正负电荷所在位置之间的距离将发生变化，从而在晶体表面产生一个净的极化效应[Waanders, 1991]。由于这种极化效应的影响，晶体内部便产生了具有一定电势分布的电场。

压电效应最普通的应用是通过施加很高的压力来产生高电压，所产生的高压电场可以用来作为碰撞引爆器件。在声纳系统中，压电效应还可以用来发射信号以探测深度。然而，压电效应在 MEMS 和微系统中的主要应用还是致动器(如第 2 章中所述)和压力传感器以及加速度计中的动态信号转换器。同时，压电效应也可以应用于微流体流动的驱动(如第 5 章和第 6 章中所述)和喷墨打印头。

机械能与电能之间的相互转换效率可以通过机电转换因子 K 来衡量，其定义如下[Kasap, 1997]：

$$K^2 = \frac{\text{输出机械能}}{\text{输入电能}} \tag{7.9a}$$

或

$$K^2 = \frac{\text{输出电能}}{\text{输入机械能}} \tag{7.9b}$$

下面给出的有关机电效应的简单数学关系可以用于单向载荷情况下的压电换能器设计[Askeland, 1994]：

1. 应力产生的电场：

$$V = f\sigma \tag{7.10}$$

式中，V 是产生的电场，其单位是 V/m；σ 是外加的机械载荷在压电晶体上形成的应力，其单位是帕斯卡(Pa)；系数 f 为常数。

2. 电场产生的机械应变：

$$\varepsilon = Vd \tag{7.11}$$

式中，ε 是产生的应变；V 是外加的电场，其单位是 V/m；d 是压电系数，对于常见的几种压电晶体来说，其数值由表 7.14 给出。

表 7.14 一些压电晶体材料的压电系数

压电晶体	系数 $d(10^{-12}\text{m/V})$	机电转换因子 K
石英(二氧化硅晶体)	2.3	0.1
钛酸钡($BaTiO_3$)	100 ~ 190	0.49
锆钛酸铅($PbTi_{1-x}Zr_xO_3$)	480	0.72
$PbZrTiO_6$	250	
$PbNb_2O_6$	80	
罗舍耳盐($NaKC_4H_4O_6-4H_2O$)	350	0.78
聚偏氟乙烯(PVDF)	18	

资料来源：[Kasap, 1997]；[Askeland, 1994]。

式(7.10)中的系数 f 和式(7.11)中的系数 d 之间存在下面的关系：

$$\frac{1}{fd} = E \tag{7.12}$$

式中，E 是压电晶体的杨氏模量。

下面给出的两个实例展示了压电晶体材料在微器件中的信号转换器和致动器方面的应用。

例题7.4 如例题4.8中介绍，在一个硅悬臂梁的微加速度计中，采用一片薄的PZT压电晶体薄膜进行信号转换。该加速度计设计的可测量最大加速度为$10g$。PZT换能器位于悬臂梁的支撑基座处，该处在悬臂梁弯曲时产生最大应变，如图7.18所示。试求在最大加速度为$10g$时，PZT薄膜的输出电压。悬臂梁的质量可以忽略不计。

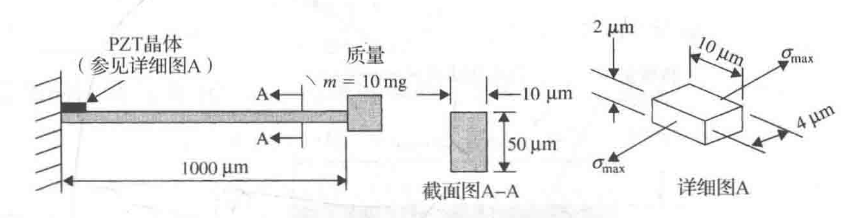


图7.18 梁式加速度计中的压电换能器

解答：本题的解可以通过确定最大弯曲应力以及使附属质量块产生$10g$加速度的动态载荷引起梁的最大弯曲应变来获得。假定梁的最大弯曲应变与所贴装的PZT薄膜的应变数值相等，则PZT所产生的电压可以利用式(7.11)来求得。

我们首先来求等效弯曲载荷P_{eq}，其等效于10 mg的质量块加速或减速到$10g$时所需的载荷：

$$P_{eq} = ma = (10 \times 10^{-6}) \times (10 \times 9.81) = 981 \times 10^{-6}\ \text{N}$$

如图7.19所示，梁式加速度计可等效为一个静态载荷悬臂梁，其自由端受等效力的作用。

其最大弯矩为：$M_{max} = P_{eq}L = (981 \times 10^{-6})(1000 \times 10^{-6}) = 0.981 \times 10^{-6}\ \text{N} \cdot \text{m}$

我们需要梁截面积的惯性矩I来计算最大等效弯曲应力σ_{max}。在例题4.8中已经计算求得I值为$0.1042 \times 10^{-18}\ \text{m}^4$。因此可以求出支撑端的最大弯曲应力为：

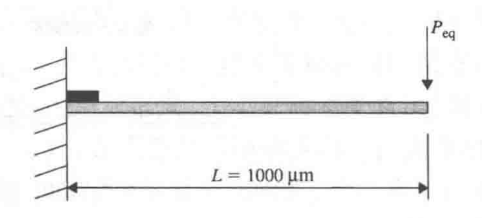


图7.19 加速度计中悬臂梁的等效静态弯曲

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}C}{I} = \frac{(0.981 \times 10^{-6})(25 \times 10^{-6})}{0.1042 \times 10^{-18}} = 235.36 \times 10^6\ \text{Pa}$$

式中，C为梁截面高度的一半。

由此求得梁所对应的最大弯曲应变ε_{max}为：

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{235.36 \times 10^6}{1.9 \times 10^{11}} = 123.87 \times 10^{-5}\ \text{m/m}$$

在上面的计算中，我们根据表7.3中给出的数据，取硅梁的杨氏模量$E = 1.9 \times 10^{11}$ Pa。

假设梁的弯曲应变将导致贴装的PZT薄膜产生相同的应变。因此PZT薄膜的应变也为123.87×10^{-5} m/m，由此导致晶体上产生的电场为：

$$V = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{\varepsilon_{max}}{d} = \frac{123.87 \times 10^{-5}}{480 \times 10^{-12}} = 0.258 \times 10^7\ \text{V/m}$$

在上面的计算中，我们根据表7.14中给出的数据，取压电系数$d = 480 \times 10^{-12}$m/V。

由于贴装到梁上的 PZT 晶体实际长度为 $l=4\mu m$，因此可以计算出换能器在10g 载荷下产生的总电压为：

$$v = V\ell = (0.258 \times 10^7)(4 \times 10^{-6}) = 10.32 \text{ V}$$

例题7.5　采用 PZT 压电晶体来驱动喷墨打印头，试求喷出一滴液滴所需的电压。喷出液滴的分辨率为每英寸 300 点(dpi)。假设液滴在纸上形成的点状薄膜厚度为 1 μm，打印头的几何形状及尺寸如图 7.20 所示。假设液滴的形状为球形，且墨水池在每次喷射后总是被重新充满。

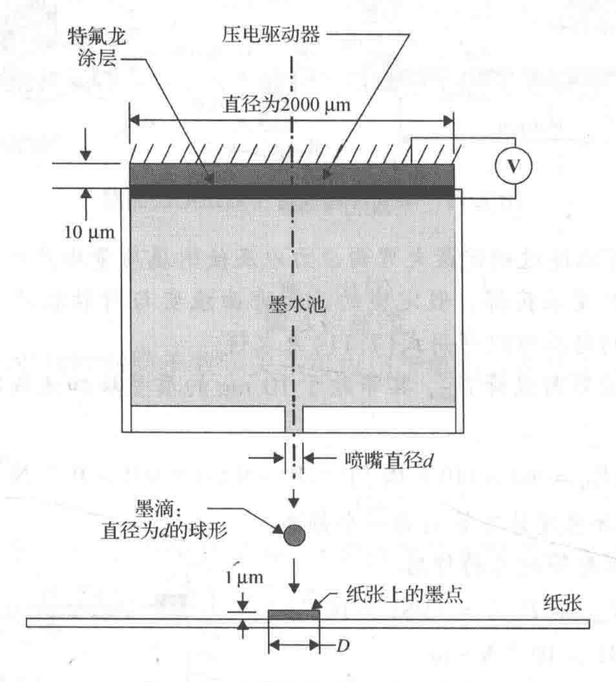


图 7.20　喷墨打印头结构示意图

解答： 首先必须求出喷嘴的直径 d，其对应的墨滴在纸上的分辨率为 300 dpi。首先确定纸上墨点的直径 D。由于在 1 in 长的空间上有 300 个这样的墨点，我们很容易算出相应的墨点直径为 $D=1$ in/300 = 25.4 mm/300 = 0.084 666 mm，或 84.67 μm。

由于墨点是由直径为 d 的球形墨滴产生的，因此，通过令从喷嘴喷出的墨滴体积与纸上的墨点体积相等，可以得到下面的关系式：

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)(t)$$

式中，r 为球状墨滴的半径；t 为纸上墨点的厚度。因此在 $D=84.67$ μm、$t=1$ μm 的条件下，可以求出球状墨滴的半径为 $r=11.04\times10^{-6}$ m。

接下来，假设离开墨水池的液滴体积等同于墨水池背面 PZT 压电盖板沿垂直方向膨胀的体积。令压电盖板在垂直方向上的膨胀量为 W，其对应移动的墨滴体积为$(\pi/4)\Delta^2 W$，其中 Δ 为压电盖板的直径，其数值为 2000 μm。

由于压电盖板膨胀移动的墨滴体积与喷出的墨滴体积 V_{dot} 相等，因此可以计算出所需的压电膨胀量 W 为：

$$W = \frac{4V_{\text{dot}}}{\pi\Delta^2} = \frac{4 \times 5629.21 \times 10^{-18}}{3.1416(2000 \times 10^{-6})^2} = 1791.83 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

其对应的压电盖板应变为：

$$\varepsilon = \frac{W}{L} = \frac{1791.83 \times 10^{-12}}{10 \times 10^{-6}} = 179.183 \times 10^{-6}\ \text{m/m}$$

根据式(7.11)和以及表 7.14 中给出的 PZT 晶体的压电系数，可以求出所需的外加电场为：

$$V = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{179.183 \times 10^{-6}}{480 \times 10^{-12}} = 0.3733 \times 10^{6}\ \text{V/m}$$

由于压电盖板的厚度仅为 10 μm，因此所需的外加电压为：

$$v = LV = (10 \times 10^{-6})(0.3733 \times 10^{6}) = 3.733\ \text{V}$$

7.10　聚合物

聚合物通常包括塑料、粘结剂、有机玻璃以及透明合成树脂(也叫卢塞特树脂)等多种材料，它已经成为 MEMS 和微系统中越来越常用的一类材料。例如我们在第 2 章中介绍过的，包含 1000 个微管道、宽度为 150 mm 左右的塑料卡片已经应用于生物医学工业中的微流体电泳系统中[Lipman，1999]。环氧树脂以及某些粘结剂(例如硅橡胶等)已经广泛应用于 MEMS 和微系统的封装工艺中。

这种类型的材料通常是由有机分子(主要是碳氢化合物)的长链组成。这种组合起来的分子(即聚合物分子)长度可以达到数百纳米。聚合物材料的特点是机械强度低、熔点低和电导率差。热塑性塑料和热固性材料是工业产品中常用的两类聚合物材料。热塑性塑料可以很方便地制造成特定产品所需的形状，而热固性材料则具有较好的机械强度，并且能够承受高达 350℃的高温。由于聚合物和聚合化(生产各种聚合物的工艺过程)在工业产品中的应用正在快速增加，因此它们已经构成了一个独特的工程研究领域。要在本章中列举出全部的聚合物、塑料以及各种聚合化工艺过程是一件很不现实的事情。因此在本节中我们仅仅给出一些有关应用聚合物进行 MEMS 和微系统的设计及封装的信息。这里给出的大多数材料都可以在有关论述电子学和光电子学中的聚合物的参考文献[Chilton 和 Goosey，1995]中获得更为详细的介绍。

7.10.1　作为工业材料的聚合物

传统上，聚合物一直用作电子器件中的绝缘体、覆盖膜、电容介质膜以及集成电路芯片的衬垫膜。塑料是一种特殊形态的聚合物，它已经广泛应用于各种机器设备的零件中。下面我们概括总结出了聚合物作为工业材料的主要优点：

- 重量轻；
- 工艺处理简单；
- 原材料以及生产聚合物工艺的成本低；
- 耐腐蚀性强；
- 具有较高的电阻；
- 结构的柔韧性好；
- 尺寸稳定性好。

聚合物最吸引人的地方或许是它们分子结构的多样性。这一独特的性质给科学家和工程师们开发各种“有机合金”提供了很大的灵活性，他们可以通过混合不同的成分来生产出满足特定用途的聚合物。因此我们今天才能够在市场上获得大量不同类型的满足工业应用需求的聚合物。

7.10.2 用于 MEMS 和微系统的聚合物

聚合物已经成为 MEMS 和微系统中越来越重要的材料。它们的应用主要包括以下几种情况：

1. 光致抗蚀剂(即光刻胶)聚合物可以用于制作光刻掩模，利用光刻可以在衬底上形成所要的图形，我们将在第 8 章中详细介绍。
2. 同样的光致抗蚀剂聚合物也可以在 LIGA 工艺中用来制作具有所要求的 MEMS 器件几何形状的初模，然后再以此来制造微器件中的部件，这一点将在第 9 章中介绍。这些初模的表面还需要再镀一层金属镍才能够用于后续微部件的批量化注塑成型。
3. 在本节的后面我们将会介绍，导电聚合物可以用作 MEMS 和微系统的有机衬底。
4. 铁电聚合物的性质与压电晶体类似，也可以用作微器件中的致动源，例如微型泵中的致动源，参见 5.6.3 节的介绍。
5. LB(Langmuir-Blodgett)薄膜可以用来制造多层微结构，这与第 9 章中介绍的微加工技术类似。
6. 具有某些独特性质的聚合物可以用作毛细管中的涂层材料，以加强微流体器件中的电渗作用，参见第 3 章 3.8.2 节的介绍。
7. 聚合物薄膜可以用作微器件中的绝缘层以及微电容器中的介电材料。
8. 聚合物还广泛用作微系统中电磁干扰和射频干扰的屏蔽材料。
9. 聚合物是用于微传感器密封以及微系统封装的理想材料。
10. 某些特殊的聚合物，例如 SU-8 负性光刻胶，可以用来制备具有高深宽比的稳定微结构，参见 7.10.5 节的介绍。

7.10.3 导电聚合物

对于某些应用于 MEMS 和微系统中的聚合物来说，必须使得它们能够导电且具有较好的尺寸稳定性。聚合物材料已经广泛应用于 MEMS 的封装中，近年来随着控制聚合物材料电导率技术的成功发展，它们也开始用作某些 MEMS 部件的衬底材料。

就其本质而言，聚合物一般是电的不良导体。表 7.15 列出了几种不同材料的电导率。从中很容易看出，在所有列出的各种材料中以聚乙烯为代表的聚合物具有最低的电导率。

表 7.15 某些特定材料的电导率

材料	电导率(S/m)
导体	
铜	$10^6 \sim 10^8$
碳	10^4
半导体	
锗	10^0
硅	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
绝缘体	
玻璃	$10^{-10} \sim 10^{-8}$
尼龙	$10^{-14} \sim 10^{-12}$
二氧化硅	$10^{-16} \sim 10^{-14}$
聚乙烯	$10^{-16} \sim 10^{-14}$

采用以下 3 种方法可以使聚合物变成能够导电的材料：

1. **高温分解**：通过引入胺并将其加热到 600℃以上，可以使一种基于邻苯二甲腈的焦化聚合物变成能够导电的材料。采用这一工艺生产出来的聚合物，其电导率高达 2.7×10^4 S/m，略高于碳的电导率。
2. **掺杂**：通过引入原来就导电的聚合物结构进行掺杂，例如在聚合物的主干成分中引入某种过渡金属原子，就可以形成导电的聚合物。聚合物的掺杂既取决于掺杂剂，也和聚合物本身有关。下面是用于形成导电聚合物的掺杂剂实例：

   对于聚乙炔(polyacetylenes，简称 PA)：可采用 Br_2、I_2、AsF_5、$HClO_4$和 H_2SO_4等掺杂剂形成 P 型聚合物，而四氢呋喃(THF)中的萘基钠则可用于形成 N 型聚合物。

   对于聚对苯撑乙烯(polyparaphenylenes，简称 PPP)：可采用 AsF_5形成 P 型聚合物，而碱金属则可用于形成 N 型聚合物。

   对于聚苯硫醚(polyphenylene sulfide，简称 PPS)：可用的掺杂剂为 AsF_5。
3. **插入导电纤维**：在热固性和热塑性聚合物结构中插入导电填充物，可以形成导电的聚合物。这些填充物包括碳、铝箔、不锈钢以及金和银的纤维，其他的填充材料还包括半导体(例如硅和锗)纤维。这些纤维的长度通常在纳米量级。

7.10.4　LB(Langmuir-Blodgett)膜

Langmuir 早在 1917 年就发明了一种特殊的工艺，可以用来制备出分子尺度的聚合物薄膜，15 年之后 Blodgett 又对该工艺进行了完善，因此人们通常将其称作 LB 工艺，它是在表面活性的材料上涂抹一层挥发性的溶剂。LB 工艺通过将各种具有不同化合物成分的薄膜沉积到衬底上可以形成一个多层结构。此工艺与第 9 章中介绍的微加工制造技术很类似，因此它也是微制造技术的一种可选方案。

LB 薄膜是一类具有良好铁磁、热和压电性质的备选材料，人们也可以生产出光学特性(如折射率和抗反射率等)可控的 LB 薄膜。因此 LB 薄膜也是制造微传感器和光电器件的理想材料。下面是 LB 薄膜在微系统中的一些应用实例：

1. **铁电聚合物薄膜**：特别有用的是一种聚偏氟乙烯(PVDF)材料。这种类型薄膜的应用包括空气和水中的声换能器、触觉传感器，生物医学应用包括组织相容的植入体、心肺传感器，以及用于假肢和康复器件中的可植入换能器和传感器。表 7.14 给出了 PVDF 的压电系数。
2. **光学特性可控的涂层材料**：这类材料已经广泛应用于可以传输不同波长激光的宽带光纤中。
3. **微传感器**：许多导电聚合材料对于气体和其他环境条件的敏感性使得其特别适合应用于微传感器中。它之所以可用来探测某些特定的物质，其原理是这种聚合物的表面对某些指定的样品具有可逆的特别吸收，并且由此导致聚合物的电导率出现可测量的变化。图 7.21 给出了这种传感器的图示结构。这类传感器的原理是当它们暴露在某种样品的气体中时，聚合物传感单元的电导率将发生改变。这种传感原理与第 2 章介绍的化学传感器的原理类似。

导电聚合物也经常用于电化学生物传感器中，例如微电流的葡萄糖和半乳糖生物传感器。

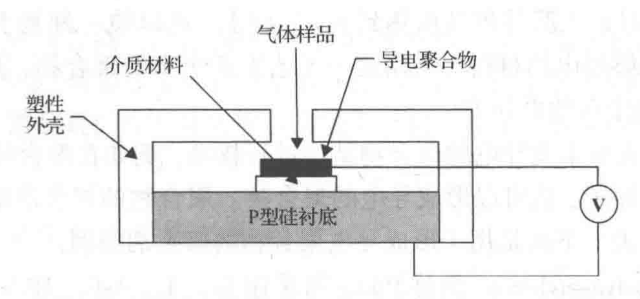


图7.21 使用聚合物的微传感器

7.10.5 SU-8光致抗蚀剂

SU-8是一种基于环氧树脂的负性聚合物光致抗蚀剂，它可应用于厚度在1 μm~2 mm的薄膜图形的制备[Conradie和Moore，2002]。这种材料最早是由IBM公司Watson研究中心的科学家发明的，并在1989年申请了专利。自1996年以来SU-8已经广泛应用于微加工技术和MEMS结构的制造技术中。作为一种光致抗蚀剂，SU-8对波长在350~400 nm的紫外线十分敏感，因此它可以用来制备微加工的光刻工艺所需用到的掩模，这一点在第8章中还会详细介绍，也可以在LIGA微制造工艺中用来形成电镀所需的图形，这一点将在第9章中详细介绍，还可以用于形成微器件中的某些永久性的结构。SU-8的化学性质稳定，且具有良好的机械性能和光学性能。采用这种材料已经制造出了各种微尺度的元件，包括微齿轮、微流体网络中的管道和阀门以及光波导等。对于采用SU-8聚合物制造出的微管道中的微型止回阀以及微型夹钳，已有相关文献给出了对其设计和性能的详细描述[Seidemann等人，2002]。

SU-8聚合物之所以能够在MEMS和微系统中获得如此广泛的应用，其主要原因在于SU-8具有两个独特的优点：(1)厚度较厚的SU-8功能性薄膜能够制备出深宽比高达50的微结构[Wright等人，2004]；(2)SU-8材料的生产成本以及在硅基微器件的部件上采用SU-8材料制备微结构的成本都非常低。关于SU-8聚合物的综合信息可以参考互联网上提供的相关资料[Guerin，2005]。表7.16给出了SU-8聚合物的某些机械性能参数。

表7.16 SU-8聚合物的机械性能参数

杨氏模量	4400 MPa
泊松比	0.22
黏度	0.06 Pa·s(40% SU-8，60%溶剂)
	1.50 Pa·s(60% SU-8，40%溶剂)
	15.0 Pa·s(70% SU-8，30%溶剂)
热膨胀系数	0.183 ppm/℃
热导率	0.073 W/cm·℃
玻璃态转变温度	200℃
反射率	1.8(100 GHz)
	1.7(1.6 THz)
吸收系数	2/cm(100 GHz)
	40/cm(1.6 THz)
相对介电常数	3(10 MHz)

资料来源：[Guerin，2005]。对比硅的热膨胀系数为2.33 ppm/℃。

商业上可以获得的 SU-8 聚合物通常呈液态形式，微化学公司是这种材料的主要供应商[Micro Chem，2007]。如表 7.16 所示，SU-8 聚合物的黏度随着固态 SU-8 树脂与溶剂之间比例关系的不同而发生相应的变化。在 8.2.2 节中将会介绍通过旋涂方式来获得 SU-8 聚合物的薄膜，图 7.22 展示了利用两种商业化等级的 SU-8 聚合物进行旋涂获得的薄膜厚度与旋涂速度之间关系。

制备 SU-8 聚合物薄膜的工艺条件取决于供应商提供的材料规范和具体的应用要求。图 7.23 给出了 SU-8 聚合物供应商提供的一个典型的工艺流程[Micro Chem，2007]。

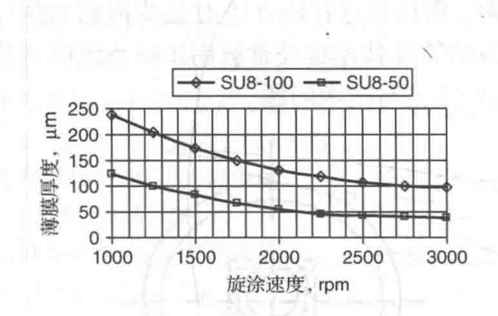


图 7.22　两种 SU-8 薄膜厚度与旋涂速度之间的关系（资料来源：[Micro Chem，2007]）

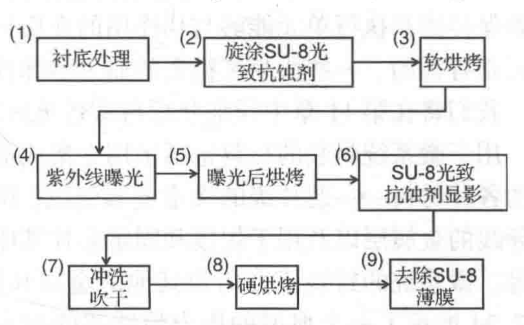


图 7.23　制备 SU-8 聚合物薄膜的典型工艺流程（资料来源：[Micro Chem，2007]）

参考图 7.23 所示的工艺流程图，在旋涂 SU-8 光致抗蚀剂之前，首先必须对衬底材料（例如硅晶圆片）进行干燥和清洁处理（即步骤 1）。使用含有 75% 的 H_2SO_4 和 25% 的 H_2O_2 的腐蚀液可以对硅晶圆片表面进行一次比较彻底的清洗。再将表面清洗干净的硅晶圆片放在温度为 200℃ 的平坦热板上烘烤 5 分钟。然后如图 8.3 所示，将干燥、清洁的硅晶圆片固定在旋涂台的顶端，并在硅晶圆片的中心位置喷洒 SU-8 溶液，喷洒的比率为每英寸硅晶圆片直径喷洒 1 毫升 SU-8 溶液，喷洒结束后立即启动硅晶圆片预定的高速旋转，旋转速度可以根据所需的薄膜厚度参照图 7.22 事先设定好，旋涂时间通常为 30 s。旋涂好 SU-8 薄膜的硅晶圆片还需要再经历一次软烘烤（即步骤 3），以便将涂层中包含的溶剂驱赶出来，这一步可以在通风良好的炉子中完成。在步骤 4 中需要将涂敷了 SU-8 薄膜的硅晶圆片放置在波长介于 350 ~ 400 nm 的紫外线灯下，从而实现对光致抗蚀剂的曝光，所需的曝光时间与特定的 SU-8 制造商提供的曝光能量有关。曝光之后还需要对光致抗蚀剂进行一次后烘烤，如步骤 5 所示，后烘烤的条件通常由 SU-8 供应商给定。接下来就可以对曝光后的光致抗蚀剂进行显影处理了，如步骤 6 所示。可以对 SU-8 进行显影处理的溶液包括乳酸乙酯、双丙酮醇，也可以是供应商指定的其他显影液。在显影过程中，可以采用图 8.3 所示的设备来喷洒显影液。没有受到紫外线曝光的那部分 SU-8 薄膜在显影过程中就会被显影液溶解并去除掉，从而在硅衬底表面形成我们所需要的 SU-8 薄膜图形。显影之后，硅衬底还需采用异丙醇等化学溶液进行简单冲洗，再经过舒缓的热空气或惰性气流吹干，如步骤 7 所示。显影后的 SU-8 薄膜还需经过一次在热空气排风良好的热板上进行的短暂硬烘烤，烘烤温度在 150 ~ 200℃ 左右。在很多情况下，需要在步骤 9 中将图形化的 SU-8 薄膜从衬底上剥离掉。根据薄膜厚度以及材料的交联密度，有多种不同的方法可以将薄膜从衬底上去除：一种方法是将整个衬底浸入到装有氧化酸溶液的特殊液池中，另一种方法是采用第 8 章中介绍的反应离子刻蚀技术，此外还有激光烧蚀法和热解法等。供应商在销售他们的产品时所提供的技术参数说明书中通常都会推荐上述这些去除 SU-8 薄膜的方法。

7.11　封装材料

在第 1 章中我们已经了解到微加工技术是从集成电路产业演变过来的。因此已经开发的许多用于集成电路的封装技术现在也可以用于微系统的封装。然而这两种类型的封装技术存在的主要区别是：在微电子应用中，封装只要能够保护集成电路芯片及其互连引线不受外界不利环境的影响就足够了；而在微系统应用中，封装不仅要保护传感和执行单元，而且还必须确保传感和执行单元能够与相作用的介质发生接触，而许多这样的介质对这些传感和执行单元是有害的。一些为封装精密的航天器部件而开发的特殊技术也经常被用于微系统的封装中。我们将在第 11 章中详细介绍与微系统封装相关的工艺与技术问题。

用于微系统封装的材料包括了用于集成电路封装的各种材料——芯片级的贵重金属引线、用作互连导线的金属层以及用于焊接和固定芯片基座的焊料等。微系统的封装还会用到其他的金属和塑料。图 7.24 展示了一个典型的压力传感器的封装示意图。在芯片层次，我们采用铝或金薄膜作为与扩散到硅片上的压电电阻之间的欧姆接触。采用同样的材料也可以实现与管壳之外的互连引线。外壳可以采用塑料或不锈钢制成，这主要由器件的工作环境决定。经常采用玻璃(例如耐热的硼化玻璃)或陶瓷(例如铝土)来制作固定芯片的基座。使硅芯片与固定基座粘到一起的粘结剂，可以采用铅-锡合金焊料、环氧树脂或者普通的室温硫化硅橡胶。在采用焊料粘结的情况下，需要在连接处溅射一层薄的金属层，以便于焊接。铜和铝是两种很好的用于溅射的候选材料。我们将在第 11 章中了解到这些用于芯片与固定基座之间粘结的材料对于隔离封装结构中来自其他部件的干扰是非常重要的。当微系统封装中的某些部分，例如硅膜，需要与有害介质接触时，则应采用硅凝胶或硅油来保护该部分。

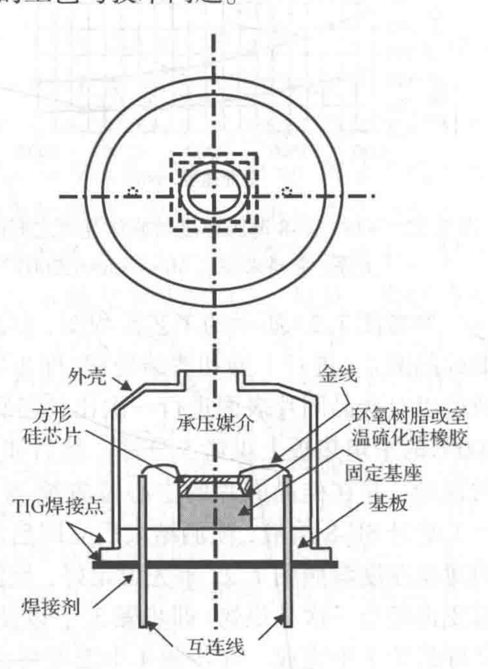


图 7.24　微压力传感器的典型封装结构

本章习题

第一部分：多项选择

1. 衬底是________。

(1) MEMS 的底层；(2) 平板状的微观物体；(3) 微电子学中的平板状宏观物体

2. 半导体材料可以通过________的方法变为导电材料。

(1) 施加高电压；(2) 施加大电流；(3) 在半导体材料中引入合适的其他原子

3. 硅的杨氏模量与________类似。

(1) 铝；(2) 不锈钢；(3) 铜

4. 硅的质量密度与________类似。

(1)铝；(2)不锈钢；(3)铜

5. 硅之所以是一种理想的 MEMS 材料，其主要原因是因为它________。

(1)具有在很宽温度范围内的尺寸稳定性；(2)既轻又结实；(3)很容易获得

6. 硅的热膨胀系数________二氧化硅。

(1)高于；(2)低于；(3)大致等同于

7. 与直径 200 mm 的晶圆片相比，直径 300 mm 的晶圆片提供了________倍的衬底面积。

(1)2；(2)2.25；(3)超过 2.5

8. 硅晶体的晶格长度为________ nm。

(1)0.543；(2)0.643；(3)0.743

9. 密勒指数用于指定面心立方晶体的________。

(1)长度；(2)晶面；(3)体积

10. 硅晶体中的(100)晶面由________个原子构成。

(1)5；(2)8；(3)6

11. 硅晶体中的(110)晶面由________个原子构成。

(1)5；(2)8；(3)6

12. 硅晶体中的(111)晶面由________个原子构成。

(1)5；(2)8；(3)6

13. 硅晶体的生长速度沿着________晶向最慢。

(1) <100>；(2) <110>；(3) <111>

14. 硅导热比二氧化硅快________倍。

(1)50；(2)150；(3)200

15. 碳化硅膜是用来保护________的。

(1)下面的衬底；(2)集成电路；(3)微系统中的电学互连引线

16. 氮化硅的强度________硅。

(1)超过；(2)不如；(3)基本等同于

17. 纯的单晶硅是________。

(1)存在于自然界中的；(2)通过特殊的工艺生长出来的；(3)采用电解方法制备的

18. 用于 MEMS 和微电子器件的晶圆片是________。

(1)单晶硅锭的产品；(2)由硅的化合物合成的；(3)存在于自然界中的

19. 建议 MEMS 的设计工程师们采用________的晶圆片。

(1)任意尺寸；(2)客户指定尺寸；(3)工业化标准尺寸

20. 在一个独立的硅晶体中包含的原子总数为________。

(1)18；(2)16；(3)14

21. 单晶硅加工过程中最牢固的晶面是________。

(1)(100)晶面；(2)(110)晶面；(3)(111)晶面

22. 用于压力传感器的硅膜凹腔 54.74°的斜度是________。

(1)通过设计选择的；

(2)晶体抵御(111)晶面的腐蚀形成的结果；

(3)晶体抵御(110)晶面的腐蚀形成的结果

23. 多晶硅获得普遍应用的原因是它很容易被制成________。

(1)半导体；(2)绝缘体；(3)电导体

24. 多晶硅薄膜在微系统中被用作________。

(1)介质材料；(2)衬底材料；(3)导电材料

25. 硅压电电阻的阻值在________方向会发生变化。
(1)所有的；(2)仅在优选的；(3)前两个选项都不正确
26. 在MEMS和微系统中，一般认为硅压电电阻的阻值变化与该压电电阻上引起的________有关。
(1)形变；(2)应变；(3)应力
27. 在硅压电电阻中存在________个压阻系数。
(1)3；(2)4；(3)6
28. 使用硅压电电阻存在的最主要缺点是________。
(1)生产这种电阻的高成本；(2)其对信号转换的高敏感性；(3)其对温度变化的高敏感性
29. 砷化镓的电子迁移率比硅高________倍。
(1)6；(2)7；(3)8
30. 在微光学器件应用中，优先选择使用砷化镓而不是硅，这是因为砷化镓材料的________。
(1)光反射率；(2)尺寸稳定性；(3)高电子迁移率
31. 在MEMS应用中，砷化镓材料的使用并不像硅材料那么普遍，这是因为其________。
(1)生产成本较高；(2)机械加工困难；(3)机械强度较低
32. 石英晶体的形状为________。
(1)立方体；(2)四面体；(3)体心立方体
33. 一般认为压电晶体产生的电压与该压电晶体的________有关。
(1)形变；(2)温度；(3)应力
34. 给一个压电晶体施加机械形变能够导致该压电晶体中________。
(1)电阻的改变；(2)电流的改变；(3)电压的改变
35. 大多数的压电晶体________。
(1)存在于自然界中；(2)是通过合成工艺制成的；(3)是通过给衬底材料进行掺杂获得的
36. 聚合物是由大量________分子构成的材料。
(1)小尺寸；(2)大尺寸；(3)长链
37. 一般说来，聚合物是________。
(1)导电的；(2)半导电的；(3)电绝缘的
38. 聚合物是________制成导体的。
(1)能够；(2)不能；(3)绝不可能
39. 在MEMS和微系统中，LB工艺可以用来生产________。
(1)薄膜；(2)芯片；(3)压电聚合物
40. SU-8是一种________的光致抗蚀剂聚合物。
(1)负性；(2)正性；(3)中性
41. 目前SU-8之所以能够在MEMS和微系统中获得非常广泛的应用，是因为这种材料________。
(1)生产成本低；(2)耐高温能力强；(3)能够形成高深宽比的微结构
42. SU-8对来自________的照射十分敏感。
(1)紫外线；(2)水银灯；(3)任何白光源
43. 在采用SU-8薄膜制备微结构的过程中，最有挑战性的是________。
(1)在衬底上涂敷较厚的薄膜；(2)对曝光后的薄膜进行显影；(3)从衬底上去除显影后的薄膜
44. 在显影SU-8薄膜的过程中，那些________区域的薄膜将会在显影液中溶解掉。
(1)未曝光；(2)曝光；(3)未被光穿透
45. MEMS和微系统的封装材料是________。
(1)限制在微电子的封装材料中；(2)各种可能的工程材料；(3)半导体材料

第二部分：计算题

1. 试估算出7.4.2节中给出的4种标准晶圆片上能够容纳尺寸为2 mm(宽)×4 mm(长)芯片的最大数量。

假设芯片在晶圆片上平行排列，且其间距为 0.25 μm。观察你所得到的结果。

2. 证明直径为 300 mm 晶圆片所能容纳的衬底面积是直径为 200 mm 晶圆片的 2.25 倍。
3. 试估算出每立方毫米和每立方微米纯硅中的原子数。
4. 如果用一个 P 型硅压电电阻来代替例题 7.4 中的压电晶体，试求出电阻阻值的变化。假设该压电电阻位于 (100) 晶面的 < 100 > 晶向上，其长度为 4 μm，并且如表 7.8 所示，该 P 型硅材料的电阻率为 7.8 Ω · cm。
5. 在例题 7.4 中，如果用 PVDF 聚合物薄膜来代替压电晶体薄膜，该压电换能器的电压输出是多少？
6. 试求出如图 7.8 所示的硅晶体 3 个主晶面上连接不同原子的晶格长度。
7. 试求出如图 7.10 所示的硅晶体 3 个晶面上原子之间的间距。
8. 在一个单晶硅晶胞中，试计算 < 100 > 晶向与 (111) 晶面之间的夹角。
9. 对于均匀的和各向同性的固体，3 个弹性常数之间的关系为 $E=2(1+\nu)G$，其中，E 为杨氏模量，ν 为泊松比，G 为剪切弹性模量。利用上述关系式求出硅单晶沿着表 7.2 中 3 个晶向的泊松比，E 和 G 使用表中给出的数值。
10. 在例题 7.5 中，如果将分辨率改为 600 dpi，其他条件不变，试求出驱动腔体中一个液滴所需的电压。

第8章　微系统制造工艺

8.1　引言

我们已经在本书中的几处提到MEMS技术是从微电子制造技术发展而来的，因此许多用于生产集成电路的工艺制造技术也已经在MEMS和微系统中被用来构造复杂的三维形体。我们将会看到，本章中介绍的各类微制造技术与用来生产传统的机器和设备的制造技术是完全不一样的，而且几乎所有的微制造技术或工艺都会涉及到对于各种材料进行必要的物理和化学处理，这些处理的效果则是那些仅仅具有传统工程学背景的工程师们所不了解的，因此这就要求设计这些产品的工程师们必须在固体物理学以及相关的微制造技术方面获取全面的知识。这些知识与经验不仅是设计分析过程中所必需的，而且对于确保所设计的产品能够生产出来也是非常必要的。

本章将为读者提供一个涉及多种MEMS和微系统制造技术的概括，每一种技术都将单独进行介绍，并在第9章中将这些微制造工艺集成在一起进行介绍。

8.2　光刻

在表1.1中给出的众多有关微电子学和微系统之间的显著特点和特征中，这两种尖端技术的一个基本区别是微系统几乎总是涉及到具有复杂三维结构的微尺度几何体。因此在微尺度下制备出高精度的几何形状图形就成了工程师们面临的一个主要的技术挑战。目前看来，光刻技术或微光刻工艺就是在衬底上制备出高精度的微尺度几何图形的唯一可行方法。

8.2.1　概述

“光刻”(lithography)一词来源于两个希腊单词：石版(litho)和书写(graphein)[Madou, 1997]。按照文献[Ruska, 1987]中的描述，光刻工艺是利用光学成像技术和一层光敏胶膜在衬底上制备出图形。光刻工艺是微制造技术中最重要的工艺步骤之一。目前看来它也是唯一可在衬底上制备出具有亚微米分辨率图形的可靠技术。从微电子学的角度来说，这些图形对于制备集成电路中的PN结、二极管、电容器等元器件都是必需的。然而在微系统方面，光刻工艺主要用来在体微加工工艺中制备腐蚀空腔的掩模图形、在表面微加工工艺中确定牺牲层薄膜的淀积和腐蚀图形以及在传感器和致动器中形成电信号传导的初步回路。

光刻的整个工艺步骤如图8.1所示。我们从左上图所示的衬底开始介绍，这个衬底可以是微电子器件所用的硅晶圆片，也可以是MEMS和微系统所用的其他(例如二氧化硅或氮化硅)衬底材料。首先将光致抗蚀剂(通常也称为光刻胶)涂敷在衬底的平坦表面上，然后将涂有光刻胶的衬底透过带有特定不透光图案的掩模板进行曝光。光刻工艺中使用的掩模板通常是由石英材料制造而成的，掩模板上的图案是利用微缩照相的方法从宏观或介

观尺寸缩小到微观的尺度。经过曝光之后，光刻胶材料的溶解特性会发生改变。曝光之后变得更易溶解的光刻胶称为正性胶；反之，未曝光处更易于溶解的光刻胶则称为负性胶。经过曝光的衬底经显影液显影处理之后，这两种不同类型的光刻胶会显示出完全相反的效果，如图 8.1 中右侧所示。经过显影之后留下来的光刻胶材料则构成了一系列转印出的图形[参见图中步骤(a)]。位于光刻胶遮盖处的衬底在随后的腐蚀过程中则因受到保护而免于腐蚀[参见图中步骤(b)]。因此当去除光刻胶之后，衬底上就留下了一个永久性的图案[参见图中步骤(c)]。

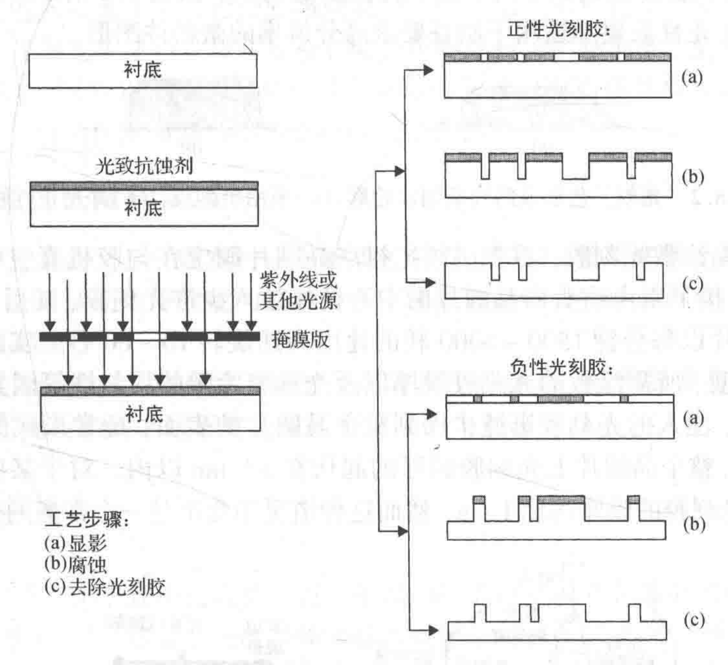


图 8.1　光刻工艺的一般步骤

MEMS 和微系统中的光刻工艺需要在洁净度为 10 级或更高的洁净室中进行。洁净室的洁净等级是洁净室中空气质量的一个度量，一个洁净度为 10 级的洁净室就是在该洁净室内每立方英尺空气中含有直径为 0.5 μm 或更大的灰尘颗粒数少于 10 个。本章中介绍的其他多数微制造工艺都能够在 100 级的洁净室中完成。这些对洁净室中空气质量的要求与那些典型的都市环境中洁净度为 500 万级的空气质量之间形成了鲜明的对比。

8.2.2　光刻胶及其应用

有很多种不同类型的光刻胶可以用于光刻工艺。我们在第 7 章中是将光刻胶作为聚合物来分类的，不同类型的光刻胶有可能得到完全不同的结果。在下面给出的几本介绍微电子工艺的书中列举了市场上可以采购到的多种正性光刻胶和负性光刻胶[Sze，1985；Ruska，1987；van Zant，1997]。

- **正性胶**：总体上说，正性胶分为两类：(1) PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)光刻胶；(2)由重氮醌酯(DQ)和酚醛树脂(N)两种成分组成的 DQN。在后一种光刻胶中，第一种成分在化合物中占的质量比为 20% ~50%。

正性胶对紫外线敏感，且在波长为 220 nm 时具有最大的敏感性。PMMA 同时也可以

用作电子束、离子束和X射线曝光的光刻胶。大多数的正性胶都能够在碱性溶液如KOH(氢氧化钾)、TMAH(四甲基氢氧化铵)以及丙酮或醋酸盐溶液中进行显影。

- **负性胶**：两种广泛使用的负性胶分别为：(1)含有两种成分的芳基氮化物橡胶光刻胶；(2)Kodak KTFR(敏感氮化聚异戊二烯橡胶，柯达公司生产的一种负性光刻胶)。负性胶对可见光和X射线的照射不太敏感，但是对电子束的照射却非常敏感。负性胶最常用的显影液是二甲苯溶液。

一般说来，正性胶定义的图形边界比负性胶更加清晰，如图8.2所示。这种更加清晰的边界分辨特性使得正性胶更加适用于制备要求高分辨率的微器件图形。



图8.2　光刻工艺形成的线条剖面轮廓：(a)采用负性胶；(b)采用正性胶

要在衬底表面涂敷光刻胶，首先必须把衬底晶圆片固定在匀胶机真空吸盘的顶部，如图8.3(a)所示。接下来由喷头向晶圆片的中心位置注入少许光刻胶，随后启动匀胶机，使得吸盘带动晶圆片以每分钟1500~8000转的速度高速旋转10~60秒。实际旋涂的转速取决于光刻胶的类型、所需涂敷的光刻胶膜厚以及光刻胶涂敷的均匀性等因素。在高速旋转的离心力作用下，注入的光刻胶迅速扩展到整个晶圆片的表面，通常形成的光刻胶膜厚在0.5~2 μm之间，整个晶圆片上光刻胶膜厚的起伏在±5 nm以内。对于某些微系统应用来说，也曾经要求光刻胶的膜厚达到1 cm，然而这种情况毕竟不是一个常规的标准工艺。

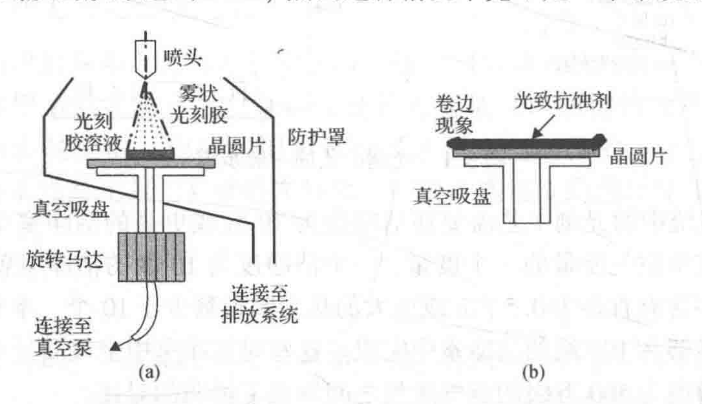


图8.3　涂敷光刻胶的过程示意图：(a)真空吸盘；(b)带卷边的光刻胶涂层

当涂敷的光刻胶膜厚达到所需的厚度时，就可以终止匀胶机的旋转。一个常见的问题是在晶圆片的边缘出现光刻胶的卷边现象[如图8.3(b)所示]，这些卷边处光刻胶的膜厚可能是其他位置处光刻胶膜厚的数倍。通过控制匀胶机的转速，通常是采用先慢速后快速的旋涂，可以减小光刻胶的卷边现象，从而提高光刻胶膜厚的均匀性。

8.2.3　光源

大多数光刻胶对波长介于300~500 nm的光十分敏感。光刻工艺最常用的光源是汞蒸气灯，这种光源提供的光谱范围介于310~440 nm之间。深紫外光源的波长范围在150~300 nm之间，而常规的紫外光源波长则介于350~500 nm之间，这些都是适用于光刻工艺的光源。

在要求极高分辨率的特殊应用场合，则可以使用 X 射线光刻，X 射线的波长范围则介于 4～50 Å(埃)(1 Å = 0.1 nm = 10^{-4} μm)。

8.2.4 光刻胶的显影

图 8.3 中用来旋涂光刻胶的装置同样也可以用于负性光刻胶的显影。首先将曝光后的硅晶圆片衬底固定在真空吸盘上，然后启动吸盘高速旋转，同时由上面的喷嘴向晶圆片表面喷洒显影液，如二甲苯，最后用蒸馏水彻底清洗晶圆片。

正性光刻胶的显影要比负性光刻胶略微复杂一些。通常我们把带有正性光刻胶的很多晶圆片一起放置在显影池中进行批量化显影，这个显影过程既包括清洗，更需要很好地控制化学反应。将显影液(例如 KOH 或 TMAH)以雾流形态低速地喷洒在晶圆片的表面。和负性光刻胶的显影一样，最后仍需喷洒蒸馏水来彻底清洗晶圆片。

8.2.5 光刻胶的去除和烘烤

光刻胶经过显影处理后，就在衬底上形成了所需的图形，接下来要清除晶圆片上留下的光刻胶浮渣，也就是使用中等强度的氧等离子体来处理显影后的硅晶圆片。这一步工艺可以去除大部分的光刻胶。

烘烤对于去除显影过程中残留下来的溶剂是非常必要的。通常需要在 120℃ 的高温下烘烤 20 分钟左右，随后的腐蚀过程将去除所有剩余的光刻胶。

8.3 离子注入

我们在第 3 章与第 7 章中已经介绍过，在 MEMS 器件中经常采用 P 型硅或 N 型硅来进行信号转换。我们同时还了解到，在硅晶体中掺入硼原子可以形成 P 型硅压敏电阻，而掺入砷原子或磷原子则可以形成 N 型硅。通常有两种方法可以对硅这样的半导体材料进行掺杂，离子注入就是其中的一种方法。

离子注入包括“迫使”自由的原子(例如硼或磷)成为带电粒子(即离子)，并将其注入到衬底中，从而导致衬底原子结构中质子数目与电子数目之间的不平衡。不管是硼离子还是磷离子都必须带有足够的动能才能够注入(即穿透进入)到硅衬底中。从这个意义上说，离子注入工艺也就是一个给离子加速以使其获得足够注入动能的过程。

从图 8.4 所示的离子注入原理图中可以看到，待注入的离子由离子源中产生并形成一个离子束。第 3 章中介绍过两种离子产生源。图 3.4 展示了如何利用电子束来产生离子，离子实际上是从气态(即等离子体状态)的物质中引出来的，然后离子束被导入到一个离子束控制器中，该控制器可以调整离子束的尺寸和方向。接下来离子束在加速管(或称之为加速器)中加速以增加其能量，在加速管中离子最终可以获得进入衬底表面的能量。离子束经过聚焦后注入到衬底中，衬底的表面通常覆盖了一层由二氧化硅制成的保护膜，或者称之为掩蔽层。高能离子进入到衬底中并与衬底中的电子和原子核发生碰撞。在碰撞过程中，离子将把它们所有的能量都转移给衬底，并最终停留在衬底中的某一深度位置处。注入的离子在硅衬底中的分布如图 8.5 所示。表 8.1 给出了几种 P 型和 N 型掺杂剂原子的离化能。

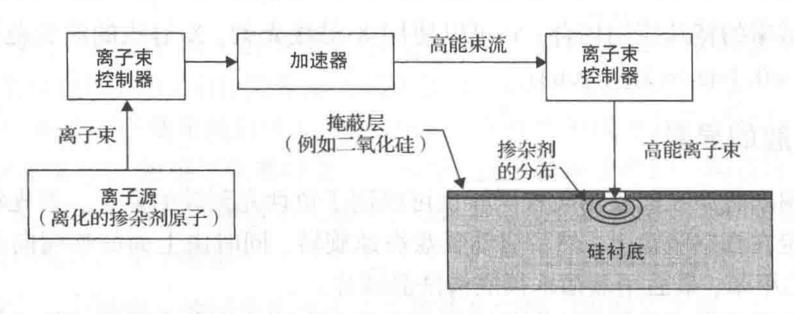


图8.4　对衬底进行离子注入的示意图

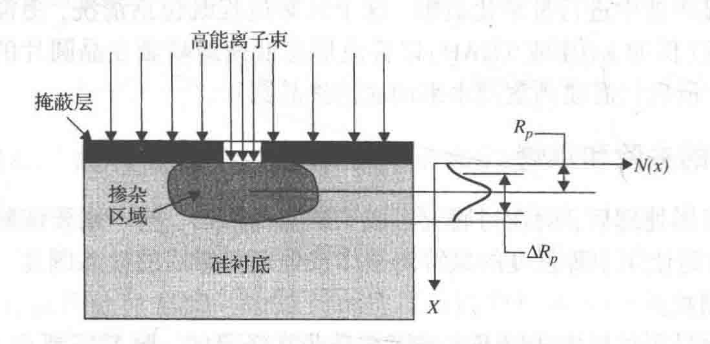


图8.5　掺杂剂在衬底中的分布[Ruska, 1987]

表8.1　硅中各种掺杂剂的离化能

掺杂剂	掺杂类型	离化能(eV)
磷(P)	N	0.044
砷(As)	N	0.049
锑(Sb)	N	0.039
硼(B)	P	0.045
铝(Al)	P	0.057
镓(Ga)	P	0.065
铟(In)	P	0.160

资料来源:[Ruska, 1987]。

与8.4节将要介绍的扩散工艺不同，离子注入工艺不需要在高温下进行。这样带来的主要优点是在衬底与掩蔽层之间只会引入很小的热应力或应变。然而这种方法存在的缺点就是杂质在衬底中的分布不太均匀，如图8.4所示，其中图8.5是其局部放大的示意图。

从图8.5中可以看到，衬底中注入杂质的最高浓度出现在衬底表面的下方，而不是在衬底表面处。注入到衬底中的杂质离子分布服从高斯(正态)分布，如图中右侧曲线所示。参照文献[Ruska, 1987]中的表述，杂质离子在衬底表面以下 x 位置处的浓度 $N(x)$ 可由下式给出:

$$N(x)=\frac{Q}{\sqrt{2\pi}\ \Delta R_p}\exp\left[\frac{-(x-R_p)^2}{2\ \Delta R_p^2}\right] \tag{8.1}$$

式中，R_p是离子注入的射程，其单位是μm；ΔR_p是射程的离散度或者称为“标准偏差”，其单位也是μm；Q 是注入离子的剂量，其单位是原子/cm^2。

表8.2给出了几种特定的掺杂剂在硅衬底中的离子注入分布情况。

表 8.2　硅中常用掺杂剂的离子注入分布

注入离子	射程 R_p(nm)	标准偏差 ΔR_p(nm)
注入能量为 30 keV 时		
硼(B)	106.5	39.0
磷(P)	42.0	19.5
砷(As)	23.3	9.0
注入能量为 100 keV 时		
硼(B)	307.0	69.0
磷(P)	135.0	53.5
砷(As)	67.8	26.1

资料来源：[Ruska, 1987]。

利用式(8.1)并结合表 8.2 中的数据可以辅助工程师们确定离子注入的杂质浓度分布、最高掺杂浓度以及注入到硅衬底中的深度。

例题 8.1　以 100 keV 的能量将硼离子注入硅衬底中。假设离子注入后的最高掺杂浓度为 $30\times10^{18}/\mathrm{cm}^3$(可以参见图 3.8)。试求：(1)式(8.1)中的注入剂量 Q；(2)在深度为 0.15 μm处的掺杂浓度；(3)掺杂浓度为最高掺杂浓度值 0.1% 处的深度。

解答：从表 8.2 中可以查到硼离子在 100 keV 能量下的离子注入射程为 307 nm，即 $R_p=307\times10^{-7}$ cm，射程的标准偏差为 $\Delta R_p=69\times10^{-7}$ cm。

1. 在式(8.1)中，我们已知 $x=R_p$ 处的最大掺杂浓度为 $N_{\max}=30\times10^{18}/\mathrm{cm}^3$，因此利用式(8.1)可得：

$$N_{\max}=\frac{Q}{\sqrt{2\pi}\ \Delta R_p}$$

由此可求出注入剂量为：$Q=(2\pi)^{0.5}(\Delta R_p)N_{\max}=(6.28)^{0.5}(69\times10^{-7}\ \mathrm{cm})(30\times10^{18}\mathrm{cm}^{-3})=5.2\times10^{14}/\mathrm{cm}^2$。

2. 要求出深度为 $x=0.15$ μm 处的掺杂浓度，利用式(8.1)可以推导出下面的关系式：

$$N(0.15\,\mu\mathrm{m})=N_{\max}\exp\left[-\frac{(0.150-0.307)^2}{2(0.069)^2}\right]=(30\times10^{18})\exp\left(\frac{-0.0246}{0.009\ 522}\right)$$
$$=2.27\times10^{18}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

3. 要求出杂质浓度为 $N(x_0)=(0.1\%)N_{\max}=3\times10^{16}/\mathrm{cm}^3$ 处的深度 x_0，可以求解下面关于 x_0的方程：

$$N(x_0)=\frac{5.2\times10^{14}}{\sqrt{2\times3.14}\times69\times10^{-7}}\exp\left[-\frac{(x_0-307\times10^{-7})^2}{2(69\times10^{-7})^2}\right]=3\times10^{16}$$

由此可以求得 $x_0=563.5\times10^{-7}$ cm，即 0.5635 μm。

8.4　扩散

我们已经在 3.6 节中介绍过扩散工艺的基本原理。在微电子技术中，我们经常采用扩散工艺来向某种材料(即衬底)的某些特定区域引入一些数量可控的其他外来物质(即掺杂剂)。

与离子注入工艺不同，扩散工艺是一个缓慢的掺杂过程。在微电子和微系统的应用中，

扩散工艺也可以用来制作薄膜器件。扩散通常在高温下进行。如图 8.6 所示，气态掺杂剂的原子在高温下可以移动(扩散)到硅衬底的晶格空位或间隙中。在图 8.6 所示的衬底中，掺杂区域的剖面分布也与离子注入有所不同。

扩散工艺的物理原理与第 5 章中介绍的固体热传导非常类似。扩散过程的数学模型是菲克定律，即式(3.3)，该式与描述固体热传导的傅里叶定律式(5.28)也非常相似。菲克定律给出了扩散过程中沿着衬底 x 方向掺杂剂原子的通量。对于外来原子进入微系统衬底中的扩散过程，我们通常使用另外一套符号来表述菲克定律：

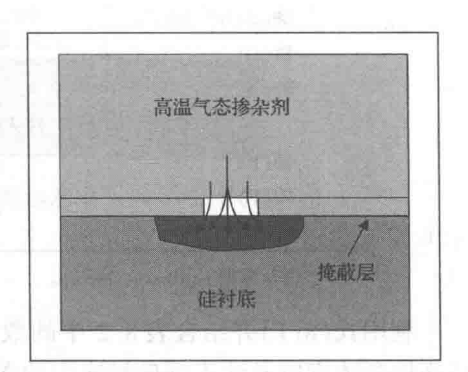


图 8.6 通过扩散向硅衬底中掺杂

$$F = -D\frac{\partial N(x)}{\partial x} \tag{8.2}$$

式中，F 是掺杂剂原子的通量，即单位时间内通过单位面积衬底掺入的杂质原子数目，其单位为原子/$cm^2 \cdot s$；D 为掺杂剂原子在衬底中的扩散系数，或者叫扩散率，其单位为 cm^2/s；N 为单位体积衬底中的掺杂浓度，其单位为原子/cm^3。

在扩散过程中的任一给定时间，掺杂剂原子在衬底中的浓度分布都可以通过求解下面的扩散方程来获得，该方程与沿着 x 坐标方向的热传导方程(5.31)非常类似。

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} \tag{8.3}$$

方程(8.3)的求解还涉及到扩散过程的初始条件和边界条件，下面就是这样一组初始条件和边界条件：

初始条件：$N(x, 0) = 0$，也就是在扩散刚开始时衬底中完全没有杂质。

边界条件：(1)$N(0, t) = N_s$，其中 N_s 就是表面处施加的气态掺杂物的浓度。(2)$N(\infty, t) = 0$，即外来杂质的扩散是局域化的，在远离表面气态杂质源处的杂质浓度可以忽略不计。

在以上的初始条件和边界条件下，方程(8.3)的解具有以下形式：

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right] \tag{8.4}$$

式中，erfc(x)是余误差函数，其定义为：

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-y^2}\,dy \tag{8.5}$$

以上述式(8.4)及式(8.5)的形式所表示的方程(8.3)的解与以式(8.5)的形式所表示的方程(3.4)的解完全类似，都是反映扩散过程的一般情形。

式(8.4)中余误差函数的数值可以根据上述积分公式计算求得，也可以直接从图 3.14 中查出。式(8.4)中的 $\sqrt{Dt}$ 项称为扩散长度。

对于硅衬底中常用的掺杂剂(例如硼、砷、磷)来说，其扩散系数 D 可以从相关的参考文献[Ruska, 1987]中找到，也可以从图 3.12 中查出。我们还可以使用从上述参考文献中给出的曲线拟合得到的式(8.6)来估算硼、砷、磷这 3 种常用掺杂剂的 D 值：

$$\ln(\sqrt{D}) = aT' + b \tag{8.6}$$

式中，D 是扩散系数，其单位是 $\mu m^2/h$；$T' = 1000/T$，其中 T 是以 K 为单位的扩散温度；式(8.6)中的常数 a 和 b 由表 8.3 中给出。

表 8.3　式(8.6)中的常数 a 和 b

掺杂剂	常数 a	常数 b
硼	-19.9820	13.1109
砷	-26.8404	17.2250
磷($N_s = 10^{21}/cm^3$)	-15.8456	11.1168
磷($N_s = 10^{19}/cm^3$)	-20.4278	13.6430

例题 8.2　在 1000℃的高温下将 $10^{11}/cm^2$ 的硼原子扩散入到硅衬底中。试求出：(1)衬底中硼掺杂浓度分布的表达式；(2)扩散 1 小时后，位于表面以下 0.1 μm 处的杂质浓度。假设硅衬底中原先不含杂质。

解答： 首先确定硼在硅衬底中的热扩散系数。这可以由表 8.3 中查得常数 a 和 b，然后再利用式(8.6)求得。式(8.6)中的温度 $T' = 1000/(1000+273) = 0.7855$，查表 8.3 得到 $a = -19.982$ 以及 $b = 13.1109$，因此求得硼在硅衬底中的扩散系数的平方根为 $D^{0.5} = 0.07534$，即 $D = 0.005676\ \mu m^2/h = 1.5766 \times 10^{-6}\ \mu m^2/s$，这个数值与图 3.12 中得到的 $D = 2 \times 10^{-6}\ \mu m^2/s$ 大致相等。

1. 根据初始条件 $N(x, 0) = 0$ 和边界条件 $N(0, t) = N_s = 10^{11}/cm^2$ 以及 $N(\infty, t) = 0$，可以采用式(8.4)形式的解来表达硅衬底中硼的浓度分布：

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right] = 10^{11} \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{1.5766 \times 10^{-6} t}}\right]$$

$$= 10^{11} \operatorname{erfc}\left(\frac{398.21x}{\sqrt{t}}\right) = 10^{11}\left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{398.21x}{\sqrt{t}}\right)\right]$$

式中 x 的单位是 μm，t 的单位是 s。

2. 当 $t = 1\ h = 3600\ s$ 时，对于 $x = 0.1\ \mu m$ 处，则有：

$$N(0.1\ \mu m, 1\ h) = 10^{11}\left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{398.21 \times 0.1}{\sqrt{3600}}\right)\right] = 10^{11}[1 - \operatorname{erfc}(0.6637)]$$

$$= 10^{11}(1 - 0.6518) = 3.482 \times 10^{10}\ cm^{-3}$$

式中误差函数 erfc(0.6637)的数值是从图 3.14 中获得的。

8.5　氧化

8.5.1　热氧化工艺

热氧化工艺无论在微电子技术中还是在微系统制造中都是一种非常重要的工艺过程。根据文献[Sze, 1985]中的分类，在微电子器件中经常会用到 4 种不同类型的薄膜：(1)用于电绝缘或热隔离的热氧化薄膜；(2)用于电绝缘的介质层；(3)用于形成局域导电的多晶硅层；(4)用作电接触或互连引线的金属薄膜。为了满足类似的需求，所有这些不同类型的薄膜在 MEMS 和微系统中也获得了广泛的应用。我们已经知道介质层可以在电容类转换器中用来隔离电极，也可以在嵌入式的转换器中用来做金属导线的绝缘层。电介质材料包括陶瓷(例如

矾土和石英)或衬底表面生长的介质薄膜(例如二氧化硅或氮化硅)。正如在第 7 章中所介绍的，多晶硅薄膜对于提供局部区域的导电层是非常必要的。金属薄膜既可以用作压阻转换器的引线，也可以用作连接硅芯片与固定底座的焊盘，例如压力传感器芯片上的压焊块。下面将重点介绍微系统中经常用来制备二氧化硅薄膜的热氧化工艺。

8.5.2　二氧化硅

二氧化硅通常用作电绝缘介质，它也可以用作腐蚀硅的掩蔽层以及表面微加工技术中的牺牲层，这一点将在第 9 章中详细介绍。有好几种方法可以在硅衬底表面制备出二氧化硅，其中热氧化方法是一种在硅衬底上形成二氧化硅薄膜的最经济的方法。该工艺中涉及到的化学反应如下：

$$\mathrm{Si}(\text{固态}) + \mathrm{O_2}(\text{气态}) \rightarrow \mathrm{SiO_2}(\text{固态}) \tag{8.7}$$

或者

$$\mathrm{Si}(\text{固态}) + 2\mathrm{H_2O}(\text{气态}) \rightarrow \mathrm{SiO_2}(\text{固态}) + 2\mathrm{H_2}(\text{气态}) \tag{8.8}$$

二氧化硅是在电阻炉中通过热氧化工艺形成的。典型的氧化炉包含一个大的石英炉管，如图 8.7 所示。炉管外壁环绕着加热用的电阻线圈，以便为炉管提供必要的高温。工业上使用的炉管规格通常直径为 30 cm，长度为 3 m。

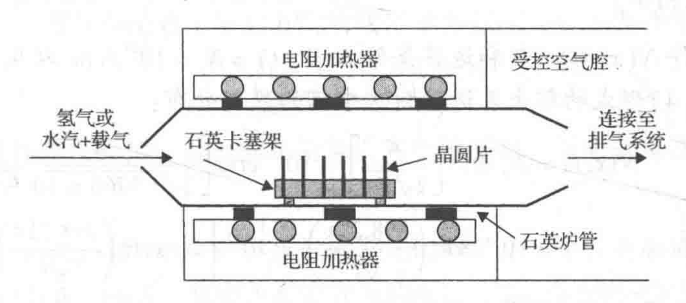


图 8.7　用于热氧化生长二氧化硅的设备

在热氧化工艺中，首先将晶圆片放置在石英卡塞架上，然后将卡塞架推进到已经预加热到温度为 900～1200℃的炉管中。接下来向炉管中通入氧气供其在晶圆片表面发生氧化。为了加速氧化过程，也经常采用水蒸气来代替氧气。为了得到预期质量和厚度的二氧化硅薄膜，必须严格控制氧化的时间、温度和气流大小。

8.5.3　热氧化的速率

在硅衬底上生长氧化层的过程首先是一个热扩散的过程，参见 8.4 节的介绍。但是由于在扩散的同时又发生了相关的化学反应，参见反应式(8.7)和式(8.8)，因此在 8.4 节中介绍的扩散理论并不能直接应用于此，除非对其做出重大的修改。由于要考虑在硅/二氧化硅界面移动条件下的质量传输和热传输而使问题的分析变得更加复杂。所谓的热氧化动力学理论已经被用来估算硅衬底上生长二氧化硅层的速率[Ruska, 1987]，图 8.8 模拟了在硅衬底上生长一层二氧化硅的过程。

首先硅衬底在加热的炉管中暴露在干燥的氧气或潮湿的水蒸气等氧化气氛中，如图 8.7 所示。氧化气氛中的氧气分子开始向硅晶圆片的“新鲜”表面扩散，如图 8.8(a)所示，由此反应形成一层二氧化硅层，如图 8.8(b)中的阴影所示，其中实心的圆圈代表二氧化硅分子。

随着氧化过程的推进，进入到氧化层中的氧气分子会通过扩散到达氧化层与硅界面处，并和硅分子发生化学反应，如图 8.8(c)所示。因此这种工艺可以看作是以氧化剂向硅衬底中的简单扩散开始，接着伴随着氧化剂向二氧化硅中的扩散，同时还有二氧化硅分子的扩散以及氧化剂与硅衬底之间的化学反应，这种化学反应又形成了新的二氧化硅与硅之间的边界。

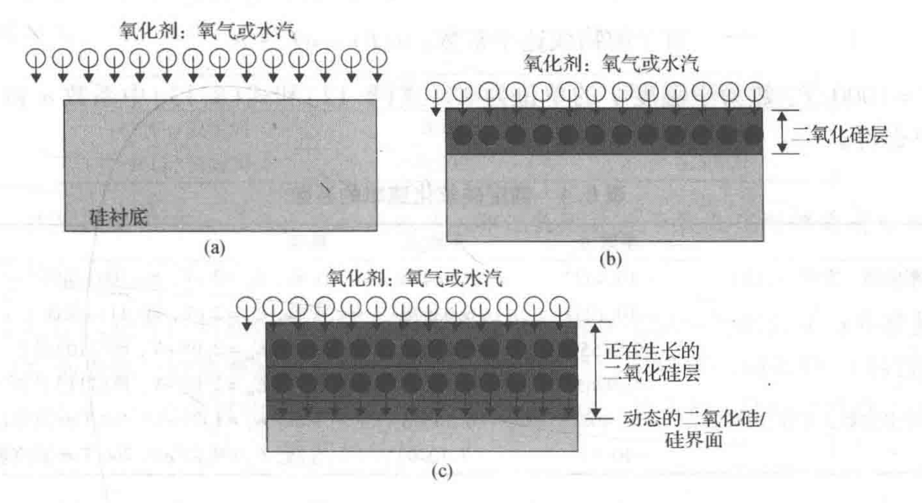


图 8.8　硅衬底上生长二氧化硅的动力学：(a)氧化初始阶段；(b)氧化层的形成；(c)氧化层的生长

在上面的描述中我们看到氧化的工艺过程非常复杂，因此要预测硅衬底上生长氧化层的速率也不是一件容易的事情。但是人们已经推导出了一个简单的集扩散/热传输与质量传输于一体的一维模型，而且该模型可以在许多已经发表的文献中查到[Sze，1985；Ruska，1987]。我们将用下面的简单表达式来估算硅衬底上氧化层的生成厚度(以微米为单位)：

$$\text{时间 } t \text{ 比较小的情形：} x = \frac{B}{A}(t + \tau) \tag{8.9}$$

$$\text{时间 } t \text{ 比较大的情形：} x = \sqrt{B(t + \tau)} \tag{8.10}$$

式中，x 是硅衬底上生长的氧化层厚度，其单位是微米(μm)；t 是氧化的时间，其单位是小时(h)；A 和 B 是常数；参数 τ 可以通过下式求得：

$$\tau = \frac{[(d_0{}^2 + 2Dd_0)/k_s]N_1}{2DN_0} \tag{8.11}$$

式中，D 是氧化剂在硅中的扩散系数，例如在900℃时 $D = 4.4 \times 10^{-16}$ cm^2/s；d_0是初始的氧化层厚度(在干氧氧化工艺中，$d_0 \approx 200$ Å，而对湿氧氧化工艺则有 $d_0 = 0$)；k_s是表面反应速率常数；N_0是载气中氧气分子的浓度，在 1000℃和一个大气压(atm)的干氧气氛中 $N_0 = 5.2 \times 10^{16}$分子/cm^3，在同样温度和压力的水蒸气中 $N_0 = 3000 \times 10^{16}$分子/cm^3；$N_1$是氧化层中的氧化剂数目，在干氧氧化工艺中 $N_1 = 2.2 \times 10^{22}$ SiO_2分子/cm^3，而在水蒸气氧化工艺中 $N_1 = 4.4 \times 10^{22}$ SiO_2分子/cm^3。

从上面的说明中我们看到，在实际的氧化工艺开始之前可能已经存在一定的初始氧化层厚度 d_0，式(8.11)中的 τ 就是为了考虑 d_0的影响而在时间轴上做出的偏移。对于湿氧氧化工艺来说，由于 $d_0 = 0$，因此 $\tau = 0$。

我们可以使用式(8.9)和式(8.10)来估算经过时间 t 之后生长的氧化层厚度。

式(8.9)中的比例常数 B/A 称为线性速率常数，而式(8.10)中的常数 B 则称为抛物线速

率常数。这些常数的数值取决于氧化反应的激活能以及发生氧化反应的硅晶体表面的晶向。我们将给出下面的公式来拟合参考文献[Sze, 1985]中所给出的曲线：

$$\text{对于线性速率常数：}\log\left(\frac{B}{A}\right) = aT' + b \tag{8.12}$$

$$\text{对于抛物线速率常数：}\ln(B) = aT' + b \tag{8.13}$$

式中，$T' = 1000/T$，热力学温度 T 的单位为 K。式(8.12)和式(8.13)中系数 a 和 b 可以从表 8.4 中查得。

表 8.4　确定硅氧化速率的系数

常数	系数 *a*	系数 *b*	条件
线性速率常数，方程(8.12)	-10.4422	6.96426	干氧，E_a = 2 eV，硅(100)晶面
	-10.1257	6.93576	干氧，E_a = 2 eV，硅(111)晶面
	-9.905525	7.82039	水汽，E_a = 2.05 eV，硅(110)晶面
	-9.92655	7.948585	水汽，E_a = 2.05 eV，硅(111)晶面
抛物线速率常数，方程(8.13)	-14.40273	6.74356	干氧，E_a = 1.24 eV，760 Torr 真空度
	-10.615	7.1040	水汽，E_a = 0.71 eV，760 Torr 真空度

式(8.9)和式(8.10)都是用来估算特定的氧化时间所生长的氧化层厚度的，这就带来了一个问题。式(8.9)的线性特征反映了氧化工艺初始阶段氧化层的生长情况。然而随着氧化层厚度的不断增加，扩散与化学反应的耦合效应占据了主导地位，此时氧化层厚度的增加变为非线性的。这样一来式(8.10)就成了一种更为实际的估算氧化层厚度的方法。由于对氧化工艺时间长短的定义还取决于具体的氧化工艺条件，因此对上述两个公式可以正确应用的范围也没有一个明确的分界线。

例题 8.3　试估算在 950℃ 的高温条件下，对清洁的(111)晶面的硅晶圆片分别进行一个半小时的干氧氧化或湿氧氧化所生成的二氧化硅层厚度。

解答：由于晶圆片表面没有初始氧化层，因此不需要考虑氧化时间的偏移，即式(8.9)和式(8.10)中的 $\tau = 0$。这样，在干氧氧化和湿氧氧化条件下生长的氧化层厚度都可以用以下的表达式来估算：

$$\text{当时间 } t \text{ 比较短时：} x = \frac{B}{A}t \tag{a}$$

$$\text{当时间 } t \text{ 比较长时：} x = \sqrt{Bt} \tag{b}$$

上述表达式中的常数 A 和 B 可以利用式(8.12)和式(8.13)求得，其中的系数 a 和 b 则由表 8.4 给出。我们对这些系数的选择如下表所示：

	a	*b*	氧化条件
方程(8.12)	-10.1257	6.9357	干氧氧化
方程(8.12)	-9.9266	7.9486	水汽氧化
方程(8.13)	-14.4027	6.7436	干氧氧化
方程(8.13)	-10.6150	7.1040	水汽氧化

可以求得温度 $T' = 1000/(950 + 273) = 0.8177$，把 T' 和上述系数代入式(8.12)和式(8.13)，就可以得到常数 B/A 和 B，如下表所示：

	干氧氧化	水汽氧化
B/A(μm/h)	0.045 32	0.6786
B(μm²/h)	0.006 516	0.2068

再利用前面给出的式(a)和式(b)，就可以分别估算出在干氧氧化和湿氧氧化条件下生长的氧化层厚度，如下表所示：

	干氧氧化厚度(μm)	湿氧氧化厚度(μm)
式(a)短时间	0.068	1.018
式(b)长时间	0.0989	0.5572

从上述计算结果中可以总结出这样的结论，即湿氧氧化比干氧氧化能够更有效地穿透到硅衬底的深处。

如果求解的问题涉及到初始氧化层，那么预测生长的氧化层厚度就会变得非常复杂，因为此时需要根据表面反应速率常数 k_s 的数值并利用式(8.11)来确定时间参数 τ 的数值。在这种情况下，k_s 也可以称为硅氧化速率常数，这个常数是温度、氧化剂、晶向以及掺杂浓度的函数。我们将在8.6节中来讨论 k_s 数值的估算。

8.5.4 由颜色来确定氧化层厚度

二氧化硅和氮化硅薄膜都具有和硅衬底完全不同的颜色。二氧化硅薄膜本质上是透明的，但是因为它和硅衬底具有不同的光折射率，因此当有白光照射到其表面时，我们就能在其表面看到各种与氧化层厚度相对应的不同颜色。二氧化硅层表面的颜色是不同的反射光线相互干涉的结果，因此同样的颜色有可能代表不同的氧化层厚度并不会令人感到奇怪。表8.5中给出了某些特定厚度的二氧化硅层表面颜色的列表。更为完整的颜色列表则可以从几本著名的参考文献[Ruska, 1987; Madou, 1997; van Zant, 1997]中找到。

表8.5 几种不同厚度二氧化硅层的颜色

SiO_2厚度(μm)	0.050	0.075	0.275 0.465	0.310 0.493	0.50	0.375	0.390
颜色	棕黄色	褐色	紫红色	蓝色	绿色至黄绿色	黄绿色	黄色

8.6 化学气相淀积

在衬底以及其他MEMS和微系统部件的表面沉积一层薄膜是微制造技术中的一个常见的和必需的手段。和我们在前面章节中了解到的扩散及热氧化工艺不同的是，淀积工艺并不会消耗衬底的材料，它只是往衬底表面添加一层薄膜。在很多种情况下，都需要在衬底表面再增加一层不同材料的薄膜，这些薄膜材料可能是有机材料，也可能是无机材料。它们包括各种不同的金属材料，最常见的是铝、银、金、钛、钨、铜、铂和锡。这些材料还包括一些化合物，例如常用的具有形状记忆功能的NiTi合金和ZnO压电材料等，在第5章中曾介绍利用这类材料做微流体管道中的涂层。我们在第2章中也介绍过具有形状记忆功能的合金材料在微器件中的应用。

一般说来，在微电子技术和微制造工艺中有两类淀积方法，即物理气相沉积(PVD)和化

学气相沉积(CVD)。PVD 主要涉及粒子对热衬底表面的轰击，而 CVD 则涉及热对流和质量传输，同时还伴随有衬底表面的扩散及化学反应。CVD 是一个比 PVD 更为复杂的工艺，但是其薄膜淀积速率和淀积质量均优于 PVD。大多数的 CVD 工艺会用到低气压，另外还有一些则需要在高真空中进行。我们在下面的章节中将重点介绍 CVD 工艺。

8.6.1 CVD 的工作原理

CVD 工艺的工作原理首先涉及携带扩散反应物的气体流过热衬底的表面，这种携带反应物的气体通常称为载气。当这些气体流过热的固体表面时，表面温度提供的能量就会引起气体中反应物的化学反应，从而在反应过程中和反应后形成薄膜，反应过程中形成的副产物则被排出，这样就能够在衬底表面淀积一层具有特定组分的薄膜材料。人们已经设计了多种不同类型的 CVD 反应器来完成 CVD 工艺，图 8.9 所示就是两种典型的 CVD 反应器。

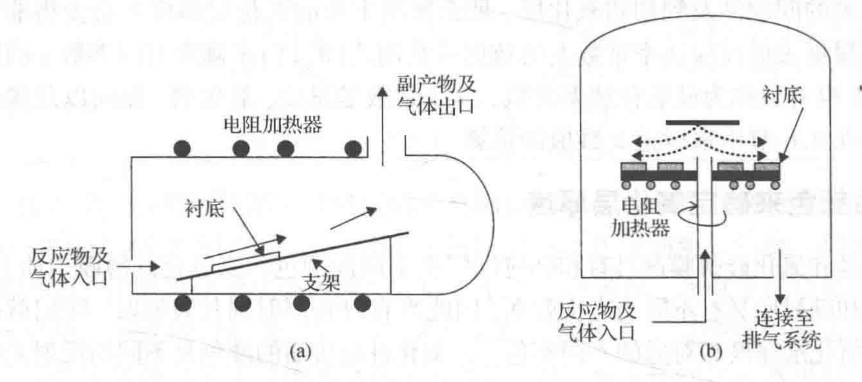


图 8.9 两种典型的 CVD 反应器：(a)卧式反应器；(b)立式反应器

无论在哪一种反应器中，都必须把衬底表面直接对着携带扩散反应物的气流。电阻加热器可以环绕在反应腔的四周，如图 8.9(a)所示，也可以直接置于放置衬底的托盘下方，如图 8.9(b)所示。

8.6.2 CVD 工艺中的化学反应

我们将介绍在硅衬底上淀积 3 种常见的薄膜材料所涉及的化学反应：(1)二氧化硅；(2)氮化硅；(3)多晶硅。

二氧化硅 可以通过扩散工艺在硅表面形成二氧化硅薄膜，如 8.4 节中所述。在此我们将学习如何通过化学反应在硅衬底的表面淀积二氧化硅薄膜。有很多种化合物都可以用来在硅衬底上淀积二氧化硅薄膜，这些化合物包括 $SiCl_4$、$SiBr_4$以及 SiH_2Cl_2[Ruska, 1987]。在这些淀积工艺中可以使用的载体气体包括 O_2、NO、NO_2以及带有 H_2的 CO_2。在 CVD 工艺中最常用的反应物是硅烷(SiH_4)与氧气(O_2)。该工艺中发生的化学反应可以表示为：

$$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2 \tag{8.14}$$

该化学反应发生的温度范围在 400～500℃之间，其激活能 E_a在 0.4 eV 左右。

氮化硅 氨气是一种常用的在硅衬底上淀积氮化硅薄膜的载气。有 3 组常用的反应物能够通过化学反应形成氮化硅薄膜[Ruska, 1987]：

$$3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2 \tag{8.15a}$$

$$3SiCl_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12HCl \tag{8.15b}$$

$$3SiH_2Cl_2 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 6HCl + 6H_2 \tag{8.15c}$$

上述化学反应所需的激活能 E_a 均为 1.8 eV。方程式(8.15a)中 SiH_4 的反应温度范围在 700~900℃之间；方程式(8.15b)中 $SiCl_4$ 的反应温度为 850℃；而方程式(8.15c)中 SiH_2Cl_2 的反应温度范围在 650~750℃之间。

多晶硅 正如7.5.4节中所述，多晶硅薄膜是由不同尺寸的单晶硅颗粒所组成的。多晶硅的淀积工艺实际上就是一个高温热分解过程，该热分解的化学反应方程式为：

$$SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2 \tag{8.16}$$

该工艺实施的温度范围在 600~650℃之间，其激活能为 1.7 eV。

8.6.3 淀积的速率

我们从 8.6.1 节和 8.6.2 节中了解到 CVD 工艺就是在热的衬底表面通过反应物与载气的化学反应而形成特定材料的薄膜，因此薄膜淀积的速率显然就是工艺设计工程师们最关心的问题，因为在很多情况下三维 MEMS 结构的制备主要就是依靠这些薄膜的淀积而形成的。

现在来看图 8.10(a)所示的情形，其中的反应物与载气以一定的速度流过热的硅衬底表面。图 8.10(b)给出了更详细的流过衬底表面的载气与反应物所组成的混合气体的速度分布曲线 $V(x)$。我们已经从 5.7.5 节中了解到，无论何时只要有流体流过固体的表面，在固体与流体的交界面上必定会存在一个厚度为 $\delta(x)$ 的边界层。在热传输过程中，这个边界层是非常重要的，因为它会起到一个附加热碍的作用。在扩散过程中也会有类似的现象发生，因为反应物也需要额外的时间才能够扩散通过这个边界层。因此边界层是影响化学反应的一个重要因素，它会直接影响在衬底表面淀积特定薄膜的速率。

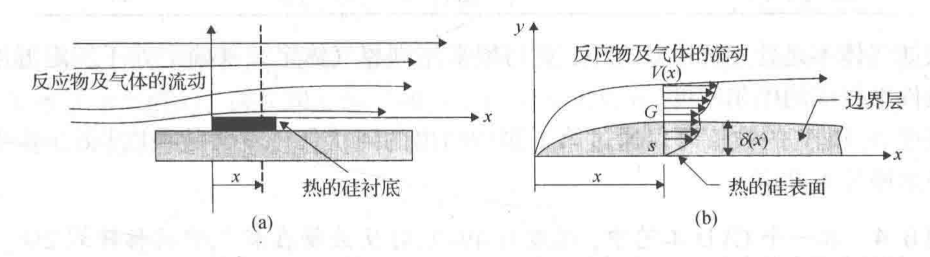


图 8.10 CVD 腔体中的热/流体状况：(a)衬底表面的气流；(b)速度分布和边界层

离硅晶圆片衬底前端边沿的距离为 x 处边界层的近似厚度 $\delta(x)$ 可以通过下面的表达式求出：

$$\delta(x) = \frac{x}{\sqrt{\mathrm{Re}(x)}} \tag{8.17}$$

式中，$\mathrm{Re}(x)$ 是气体混合物的雷诺数。根据式(5.3)给出的定义，雷诺数可以表示为：

$$\mathrm{Re}(x) = \frac{\rho L V(x)}{\mu} \tag{8.18}$$

式中，ρ 是气体混合物的质量密度；L 代表流体的特征长度；μ 则表示气体的动力黏度，它可以从表 8.6 中查得。

表8.6 CVD工艺所使用气体的动力黏度

气体	动力黏度(μP)			
	0℃	490℃	600℃	825℃
氢气(H_2)	83	167	183	214
氮气(N_2)	153	337	—	419
氧气(O_2)	189	400	—	501
氩气(Ar)	210	448	—	563

1泊(P) = 1 dyne · s/cm^2 = 0.1 N · s/m^2 = 0.1 kg/m · s

资料来源：[Ruska, 1987]。

反应物沿着边界层厚度方向的扩散通量**N**，即在单位时间通过单位面积边界层的原子或分子数(其单位是原子或分子/m^2 · s)，可以采用3.6节介绍过的菲克定律来描述。在当前这种情况下，利用菲克定律扩展的数学表达式为：

$$\mathbf{N} = \frac{D}{\delta}(N_G - N_S) \tag{8.19}$$

式中，D是反应物在载气中的扩散系数，其单位是cm^2/s；N_G和N_S分别是边界层上表面以及衬底表面处反应物的浓度，N_G和N_S的单位都是单位体积内的分子数或每立方米内体积中的分子数。

浓度N_G和N_S的数值可以通过下面的步骤来确定：

1. 采用阿伏伽德罗的理论，即各种气体在标准状况下每摩尔气体的体积为22.4×10^{-3} m^3，也就是说各种气体在标准状况下的摩尔密度为44.643 mol/m^3，并且，阿伏伽德罗常数的定义为1摩尔任何气体或任何物质中所包含的分子数，该常数为6.022×10^{23}。
2. 一些常用气体的摩尔质量在下表中给出。

气体	氢气(H_2)	氮气(N_2)	氧气(O_2)	氩气(Ar)
摩尔质量(克)	2	28	32	40

3. 假如气体不是处于标准状况下，则可以采用理想气体定律来确定处于特定温度和压强条件下气体的摩尔密度。
4. 浓度N_G和N_S的数值可以通过第1步中给出的阿伏伽德罗常数乘以①第3步中求得的摩尔密度来确定。

例题8.4 在一个CVD工艺中，温度为490℃时反应物在载气中被稀释到2%。求每立方米载气中包含的分子数。工艺过程中压强的变化可以忽略。

解答：根据理想气体定律可以得到如下的关系式：

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

式中，V_1和V_2分别是气体在压强为P_1、温度为T_1以及压强为P_2、温度为T_2两种状况下的体积。

由于$P_1 = P_2$，V_2即室温为293 K时气体的摩尔体积是22.4×10^{-3} m^3/mol。由此可以求得气体在490℃(即763 K)时的摩尔密度为：

$$d_2 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right) d_1 = \left(\frac{293}{763}\right)(44.643) = 17.1433\ \text{mol/m}^3$$

① 原文为“除以”，有误。——译者注

读者可以看到，我们在上面的计算中使用了 $d_1 = 1/V_1 = 44.643\ \text{mol/m}^3$。

因此浓度 N_G(每立方米体积内的气体分子数)的数值为：

$$N_G = \text{阿伏伽德罗常数}\ d_2 = (6.022 \times 10^{23})(17.1433)$$
$$= 103.24 \times 10^{23}\text{分子}/\text{m}^3$$

因为在大多数的 CVD 工艺中，气体流动的速率都非常低，与之对应的雷诺数 Re 的数值也比较低，大约为 100，低速流动的气体使得大量的反应物能够借助扩散穿过边界层并在热的衬底表面通过化学反应形成薄膜，此时满足下述关系式：

$$\mathbf{N} = k_s N_s \tag{8.20}$$

式中的 k_s 也就是式(8.11)中的表面反应速率常数，该速率常数可以表示为：

$$k_s = k' \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \tag{8.21}$$

式中，k' 为常数，其数值取决于具体的化学反应以及反应物的浓度；E_a 是激活能；k 是玻尔兹曼(Boltzmann)常数；T 是热力学温度。

利用式(8.19)和式(8.20)消去 N_S，即可得到以表面反应速率常数 k_s 表示的载气与反应物的通量 **N** 的表达式为：

$$\mathbf{N} = \frac{DN_G k_s}{D + \delta k_s} \tag{8.22}$$

式中，δ 是如图 8.10 所示的边界层的平均厚度，式(8.17)中已经给出了它的计算表达式。

在衬底表面淀积薄膜的速率 r(其单位是 m/s)可以通过下面的表达式来估算[Ruska，1987]：

$$\text{当}\ \delta k_s \geqslant D\ \text{时},\ r = \frac{DN_G}{\gamma^{\delta}} \tag{8.23a}$$

$$\text{当}\ \delta k_S << D\ \text{时},\ r = \frac{N_G k_S}{\gamma} \tag{8.23b}$$

在式(8.23a)和式(8.23b)中，γ 是单位体积薄膜中的原子数或分子数，假定薄膜是由球形原子或分子紧密排列形成的，这些球形原子或分子的半径可以从表 8.7 中查得，则 γ 的数值可以通过下面的表达式来计算确定：

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi a^3} \tag{8.24}$$

式中，a 是从表 8.7 中查得的原子半径，其单位是米，γ 的单位则是原子/m^3 或 mol/m^3。

表 8.7　某些特定材料的原子半径和离子半径

反应物材料	原子半径(nm)	离子半径(nm)
氢(H)	0.046	0.154
氦(He)	0.046	0.154
硼(B)	0.097	0.02
氮(N)	0.071	0.02
氧(O)	0.060	0.132
铝(Al)	0.143	0.057
硅(Si)	0.117	0.198
磷(P)	0.109	0.039

续表

反应物材料	原子半径(nm)	离子半径(nm)
氩(Ar)	0.192	—
铁(Fe)	0.124	0.067
镍(Ni)	0.125	0.078
铜(Cu)	0.128	0.072
镓(Ga)	0.135	0.062
锗(Ge)	0.122	0.044
砷(As)	0.125	0.04

资料来源：[Kwok, 1997]。

例题8.5 利用CVD工艺在硅衬底上淀积二氧化硅薄膜，如化学反应方程式(8.14)所示采用氧气作为载气。如图8.11所示，采用水平放置的卧式反应器来完成CVD工艺。其他条件与例题8.4中的条件完全一致。试求：

1. 载气的密度；
2. 气体流动的雷诺数；
3. 衬底表面的边界层厚度；
4. 载气及反应物在硅衬底中的扩散系数；
5. 表面反应速率；
6. 淀积速率。

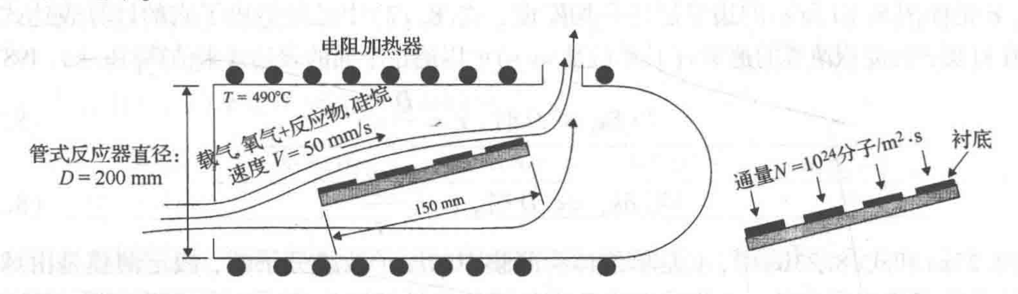


图8.11 硅衬底上的CVD工艺

解答：

1. 载气的密度ρ，可以通过载气的摩尔质量和例题8.4中已经求出的载气的摩尔密度相乘得到，氧气的摩尔质量为32 g，因此载气的密度为：

$$\rho = (32\ \text{g/mol})(17.1433\ \text{mol/m}^3) = 548.586\ \text{g/m}^3$$

2. 雷诺数Re可以通过式(8.18)来计算：

$$D = 200\ \text{mm} = 0.2\ \text{m},\quad V = 50\ \text{mm/s} = 0.05\ \text{m/s}$$

查表8.6得到：$\mu = 400 \times 10^{-6}\ \text{P} = 0.04\ \text{g/m} \cdot \text{s}$

$$\text{Re} = \frac{\rho D V}{\mu} = \frac{(548.586)(0.2)(0.05)}{0.04} = 137.147$$

3. 衬底表面与载气之间边界层的平均厚度δ可以根据式(8.17)求得，其中放置衬底的托板长度为$L = 150\ \text{mm} = 0.15\ \text{m}$，因此：

$$\delta = \frac{L}{\sqrt{\text{Re}}} = \frac{0.15}{\sqrt{137.147}} = 0.012\,81\ \text{m}$$

4. 载气及反应物的扩散系数 D 可以通过式(8.19)来计算求得，但是考虑到反应物稀释的因素，需要对该式做一些修正，增加一个浓度稀释的因子 η(本例题中 η 为2%)，因此扩散系数 D 的计算公式为：

$$D=\frac{\delta \mathbf{N}}{\eta(N_G-N_s)}$$

式中，$\mathbf{N}$ 是已知的载气通量，其数值为 10^{24} 分子数/($\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{s}$)；$N_G$是气体分子的等效密度，根据例题 8.4 的结果，其数值为 103.24×10^{23} 分子/m^3；N_S 为 0(假定在薄膜内为完全扩散)。

因此可以求得扩散系数 D 为：

$$D=\frac{(0.01281)(10^{24})}{(0.02)(103.24\times10^{23})}=0.062\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}$$

5. 可以采用下面的表达式来计算表面反应速率 k_s，它是由式(8.22)推导出来的：

$$k_s=\frac{D\mathbf{N}}{DN_G-\delta\mathbf{N}}=\frac{(0.062)(10^{24})}{(0.062)(103.24\times10^{23})-(0.01281)(10^{24})}=0.09884\ \mathrm{m/s}$$

6. 根据 δk_s数值的不同，可以考虑采用式(8.23a)或式(8.23b)来计算出淀积速率 r 的近似值，本例题中 δk_s 的数值为：

$$\delta k_s=(0.01281)(0.09884)=0.0013<<D=0.062$$

因此可以采用式(8.23b)来计算出淀积速率 r 的近似值，只是考虑到反应物的稀释因素，需要对式(8.23b)做一点修正，即：

$$r=\eta\frac{N_Gk_s}{\gamma}$$

从表 8.7 中可以查到硅的原子半径 a_{Si}和氧的原子半径 a_{O_2}：

$$a_{\mathrm{Si}}=0.117\ \mathrm{nm}=0.117\times10^{-9}\ \mathrm{m}\quad a_{\mathrm{O}_2}=0.06\ \mathrm{nm}=0.06\times10^{-9}\ \mathrm{m}$$

我们现在做一个大胆的假设，即认为 SiO_2分子的半径可由硅原子半径和氧原子半径相加得到，即 $a_{\mathrm{SiO}_2}=0.177\times10^{-9}$ m，因此单位体积的 SiO_2 薄膜中包含的 SiO_2 分子数可以通过式(8.24)求得：

$$\gamma=\frac{1}{(4/3)\pi(a_{\mathrm{SiO}_2})^3}=\frac{1}{(4/3)(3.14)(0.177\times10^{-9})^3}=4.3074\times10^{28}$$

由此可以求得薄膜的淀积速率为：

$$r=\frac{N_Gk_s}{\gamma}=(0.02)\frac{(103.24\times10^{23})(0.09884)}{4.3074\times10^{28}}=0.4738\times10^{-6}\ \mathrm{m/s},\ 或\ 0.47\mu\ \mathrm{m/s}$$

工艺工程师们必须清楚地认识到，化学气相淀积工艺的淀积速率受到以下几个因素的影响：

(1)温度：$T^{3/2}$；

(2)载气的压力：P^{-1}；

(3)气体的流速：V^{-1}；

(4)沿气体流动方向上的距离：$x^{1/2}$，x 如图 8.10(b)中的标注所示。

8.6.4　增强型的CVD

我们前面介绍的CVD工艺部分涉及到比较高的工艺温度，但是其气压和正常的大气压非常接近，通常也把这种CVD工艺称为APCVD，即常压CVD。除此之外还经常会用到另外几种CVD工艺，它们或者可以得到更高的薄膜生长速率，或者可以获得更好的薄膜质量，我们在此将介绍两种比较常用的增强型CVD工艺。

1. 低压CVD(LPCVD)： 正如从式(8.23)中看到的那样，淀积膜的生长速率与边界层的厚度(δ)成反比，但是与载气中反应物的扩散系数(D)成正比。我们从式(8.17)中也已经知道，边界层厚度δ与雷诺数Re的平方根成反比，而扩散系数则与压强成反比。由式(8.18)可知，雷诺数取决于气流速率V、动力黏度μ和密度ρ。

现在我们考虑将淀积工艺中的气压减小为原来的千分之一，我们可以预计扩散系数D将因此而增大1000倍，但是密度同样也会减小为原来的千分之一。在这个工艺中，当气压减小为原来的千分之一的情况下，气体的流速将减小为原来的十分之一至百分之一，气体流速的变化将导致雷诺数的净值减小为原来的十分之一至百分之一，这也就意味着边界层厚度δ将净增大$(10)^{1/2} \approx 3$倍至$(100)^{1/2} = 10$倍。尽管边界层厚度δ增大了3~10倍，但是扩散系数D增大了1000倍，这仍将导致方程(8.19)中的扩散通量N增大100~300倍①，因此很显然，气压的减小将导致淀积速率的增大。结果正如我们在上一节中所述，薄膜的淀积速率反比于气压。

LPCVD工艺正常工作在大约1 Torr(1 mmHg)的真空下，它所使用的反应腔与APCVD工艺没有太大的差别。但是LPCVD工艺的反应腔必须是真空防漏的，其结构强度也必须能够足以抵抗正常工作时的真空压强。在典型情况下其最终淀积形成的薄膜也更为均匀。LPCVD技术允许大量硅晶圆片同时进行处理，所以在大批量生产制造中是非常具有吸引力的。

2. 等离子增强CVD(PECVD)： 我们前面介绍的各种CVD工艺都需要对衬底以及载气进行加热，从而使其达到较高的温度才能够有足够的激活能来维持化学反应，但是高温也会给衬底带来损伤，特别是带有金属层的衬底。等离子增强CVD(PECVD)利用射频等离子体给反应物气体提供能量，与APCVD或LPCVD工艺相比，它允许衬底保持在较低的温度状态下。射频源可以是频率在3 kHz~300 GHz之间的电磁射线，也可以是同样频率范围内的交流电流。为了确保所淀积薄膜的质量，必须精确控制衬底表面的温度。一个典型的PECVD反应器如图8.12所示。

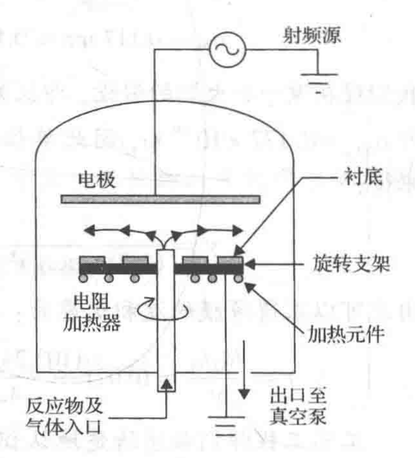


图8.12　一个PECVD反应器

表8.8给出了3种主要CVD工艺的性能总结和对比。它给工艺工程师们在为他们的微系统选择合适的CVD工艺方案时提供了一个有用的指导原则。

① 原文为10~30倍，有误——译者注

表 8.8　3 种主要 CVD 工艺的总结和对比

CVD 工艺	压力与温度	正常淀积速率 (10^{-10} m/min)	优点	缺点	应用领域
APCVD	100 ~ 10 kPa，350 ~ 400℃	700(SiO_2)	工艺简单，淀积速率快，温度低	台阶覆盖差，容易引起颗粒沾污	掺杂或不掺杂的氧化层
LPCVD	1 ~ 8 Torr，550 ~ 900℃	50 ~ 180(SiO_2)，30 ~ 80(Si_3N_4)，100 ~ 200(多晶硅)	纯度高，均匀性好，适用于大晶圆片	温度高，淀积速率慢	掺杂或不掺杂的氧化层、氮化硅、多晶硅，也可以淀积钨
PECVD	0.2 ~ 5 Torr，300 ~ 400℃	300 ~ 350(Si_3N_4)	衬底温度低，快速，薄膜粘附性好	容易受到化学沾污	在金属层上淀积低温绝缘层，钝化层

资料来源：[Madou，1997]。

8.7　物理气相淀积——溅射

溅射通常是用来在衬底表面淀积厚度为 100 Å(1 Å = 10^{-10} m)左右的金属薄膜的工艺。金属薄膜(或金属层)是用来传输传感器中产生的电信号的，或者是为执行器提供电源电流的。例如在图 8.13(a)中，金属薄膜层就是用来传输微型压力传感器中压敏电阻上产生的电信号的，详细的电连接关系安排如图 8.13(b)所示。

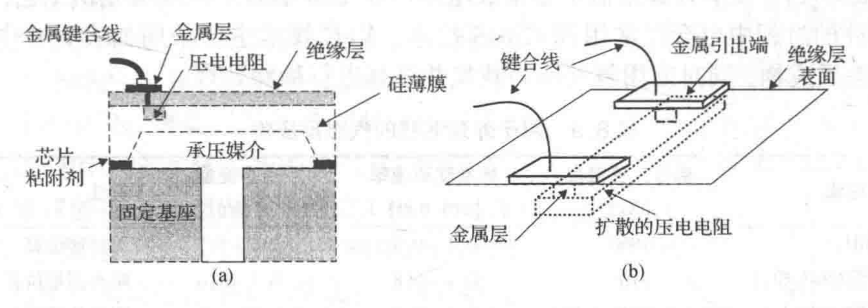


图 8.13　微型压力传感器中用于信号传输的金属层：(a)用于压敏电阻的金属层；(b)金属层的详细排列

溅射工艺一般是在压强非常低(即在高真空下，大约 5×10^{-7} Torr)的情况下采用等离子体来完成的，与前面介绍过的 CVD 工艺相比，溅射工艺要求的温度比较低。在这种温度下，化学反应几乎不会发生，因此我们也把溅射工艺称为物理淀积工艺。

我们在第 3 章中已经了解到等离子体是由带正电荷的气体离子所组成的，并且等离子体既可以由高压直流电源产生，也可以由高压射频电源产生。不管采用哪一种方法，惰性载气中的正离子都会以很高的速度轰击金属靶的表面。离子轰击的动能将导致金属离子的蒸发，将这些金属离子引导到衬底的表面，经冷凝后即淀积在衬底表面。整个工艺过程如图 8.14 所示。

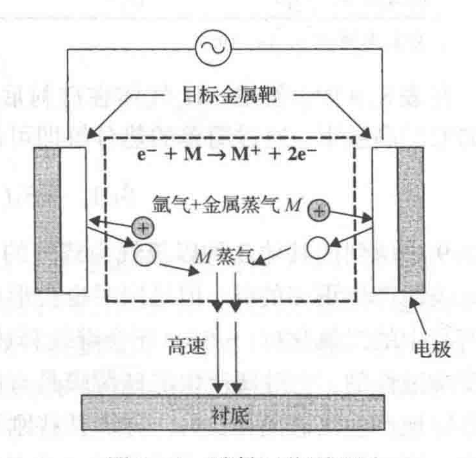


图 8.14　溅射工艺原理图

8.8　外延淀积

外延是指在单晶体衬底上生长同样单晶体材料的薄膜。例如，我们可以利用这种工艺在硅衬底上的特定区域淀积硅薄膜，从而形成具有一定厚度的微结构。这种工艺在微电子工业中经常被用来制造硅二极管和晶体管。对于MEMS和微系统来说，这项技术主要用来构造器件中的三维几何结构。

外延淀积工艺与CVD工艺在某些方面是非常相似的，例如都要利用携带反应物的载气和相同的衬底材料。但是两者的主要区别在于外延不仅能在硅衬底上淀积硅薄膜，而且还能够在硅衬底上淀积GaAs材料。由于大多数MEMS和微系统器件都采用硅作为衬底材料，因此我们在本章中主要介绍在硅衬底上外延淀积硅薄膜的工艺。

在微电子工艺技术中有几种方法可以用来进行外延淀积：

1. 气相外延(VPE)；
2. 分子束外延(MBE)；
3. 金属有机物化学气相淀积(MOCVD)；
4. 互补金属氧化物半导体(CMOS)外延。

气相外延(VPE)技术看起来似乎是集成电路产业最常用的一种外延淀积工艺，尽管在制造MEMS部件的过程中也会经常用到CMOS技术。VPE技术主要采用如表8.9中列出的各种含硅的气态反应物，同时使用氢气作为载气并对其进行稀释处理。

表8.9　用于外延淀积的气态反应物

气态反应物	标准工艺温度(℃)	标准淀积速率(μm/min)	所需能量(eV)	备注
硅烷(SiH_4)	1000	0.1~0.5	1.6~1.7	无图形位移
二氯甲烷(SiH_2Cl_2)	1100	0.1~0.8	0.3~0.6	略有图形位移
三氯甲烷($SiHCl_3$)	1175	0.2~0.8	0.8~1.0	图形位移较大
四氯化硅($SiCl_4$)	1225	0.2~1.0	1.6~1.7	图形位移很大

资料来源：[Ruska, 1987]。

在表8.9中，使用SiH_4气体在硅衬底上生长硅薄膜是其中最简单的一种方法。在大约1000℃的高温下，通过简单的热分解即可制备出硅薄膜，如下面的化学反应方程式所示：

$$SiH_4 \rightarrow Si(\text{固体}) + 2H_2(\text{气体}) \tag{8.25}$$

表8.9中所列的其他3种以氢气为载气的气相反应物将会和硅衬底的表面发生反应，从而在衬底表面产生更多的硅，但是同时也会形成诸如二氯化硅($SiC\ell_2$)和氯化氢($HC\ell$)等副产品。副产品中的二氯化硅($SiC\ell_2$)还会继续释放出更多的硅和四氯化硅($SiC\ell_4$)。氯化氢($HC\ell$)是高度腐蚀性的，它对新产生的硅薄膜具有腐蚀作用，因此我们将会看到，在工艺过程中一方面不停地产生出硅晶体，另一方面某些刚形成的硅薄膜又被反应过程中产生的副产品氯化氢($HC\ell$)腐蚀掉了。因此为了确保硅产生的速率能够超过硅腐蚀的速率，严格地控制工艺条件就变得非常重要了。

外延淀积所用到的反应器(反应腔)和那些用在化学气相淀积工艺中的反应器(如图8.9所示)非常类似，图8.15所示就是一个典型的外延淀积反应器。

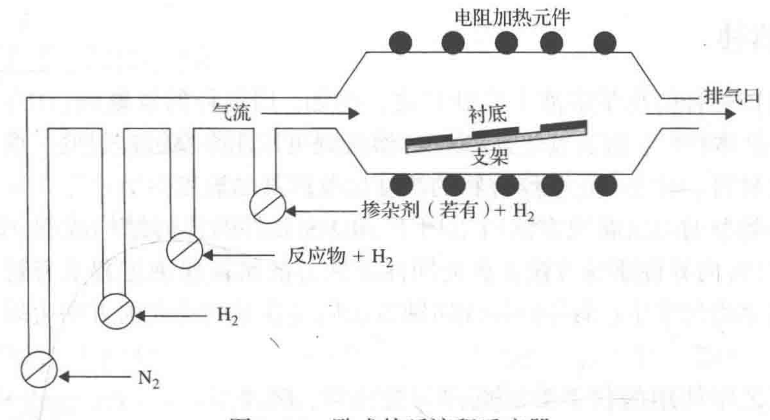


图 8.15 卧式外延淀积反应器

外延淀积由于需要在高温下使用氢气作为载气，因此具有较高的爆炸的危险性。必须用溶液对衬底表面进行彻底的清洗，并且在将衬底装入反应器的过程中及之后也必须一直保持其洁净。一旦将衬底装入反应器中之后，就必须向反应器中通入净化过的氮气。利用通入这种惰性气体来驱赶反应器中的氧气，以避免反应器中的氧气和氢气在高温下混合引起爆炸。作为载气的氢气在 500℃ 左右的中间温度下被通入到反应器中。接下来通入在表 8.9 中所选择的气态反应物和更多的氢气用于在硅衬底的外延淀积硅薄膜。正如我们在前面所述，副产品氯化氢(HCℓ)能够腐蚀所需要的硅薄膜。因此为了确保形成的硅薄膜超过被氯化氢(HCℓ)腐蚀掉的硅薄膜，必须保持对工艺条件的严格控制。淀积了硅薄膜的衬底在从反应器中取出来之前，也必须进行彻底的清洁。

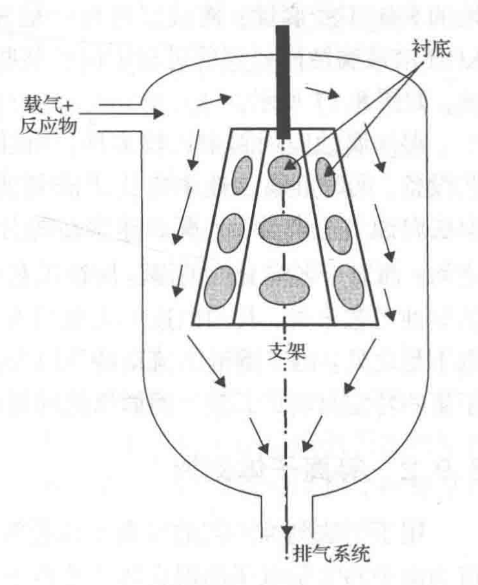


图 8.16 立式外延淀积反应器

图 8.16 展示了一个用于外延淀积的立式反应器。在图 8.15 中给出的用来控制各种气体和气态反应物混合的多路阀门也同样可以用于这种反应器中。

8.9 腐蚀

腐蚀是微制造技术中最重要的工艺之一，它指的是通过某种物理或化学手段将特定区域中的某些材料去除的过程，它是把 8.2 节中介绍的光刻工艺在衬底表面通过光刻胶显影所形成的图形进一步转化成衬底上的永久图形的一种方法。在微加工技术中，腐蚀经常被用于形成 MEMS 和微系统中各种微器件的几何形状。例如图 2.8 中展示的硅微型压力传感器芯片上的空腔就是通过腐蚀工艺形成的。类似的工艺技术还可以用来制备如图 2.41 和图 2.42 所示的微型阀中的硅薄膜和形变隔离膜。

在前面提到的两种常用的腐蚀技术中，物理腐蚀通常指的是干法刻蚀或等离子体刻蚀；而化学腐蚀也称为湿法腐蚀。本章将只介绍这两项工艺技术的工作原理，至于这两项技术的许多详细应用将在第 9 章中介绍。

8.9.1　化学腐蚀

化学腐蚀指用稀释的化学溶液来腐蚀衬底。例如，用稀释的氢氟酸(HF)溶液可以溶解 SiO_2、Si_3N_4和多晶体材料，而氢氧化钾(KOH)溶液则可以用来腐蚀硅衬底。腐蚀的速率取决于要腐蚀的衬底材料、溶液中化学反应物的浓度以及溶液的温度。

通常有两种类型的湿法腐蚀方法可以用于 MEMS 元件的几何结构成型，即：(1)各向同性腐蚀方法；(2)各向异性腐蚀方法。各向同性腐蚀方法是指腐蚀过程沿着衬底的各个不同方向以相同的速率均匀发生；而各向异性腐蚀方法则是在某些优先的方向上以较快的速率腐蚀衬底材料。

湿法腐蚀工艺中使用的化学溶液也称为腐蚀剂，腐蚀剂在湿法腐蚀过程中将与衬底上没有被掩模层所保护的部分发生化学反应。微制造技术中使用的掩模层可以是如图 8.1 所示的光刻胶，它可以在 HF 溶液腐蚀 SiO_2的过程中保护某些区域的 SiO_2不受腐蚀；掩蔽层也可以是 SiO_2薄膜层，它可以在 KOH 溶液腐蚀硅衬底的过程中保护某些区域的硅衬底不受腐蚀，如图 8.17 所示。

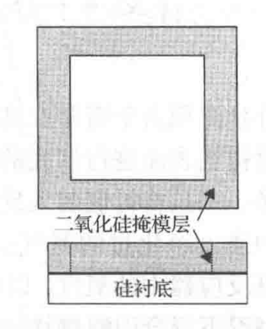


图 8.17　微型压力传感器中用于腐蚀硅腔的 SiO_2掩模层

湿法腐蚀应用起来比较方便，而且也不需要太昂贵的工艺设备，同时其腐蚀速率也比干法刻蚀快。对于各向同性的湿法腐蚀工艺来说，其腐蚀速率在每分钟几微米到几十微米之间；而对于各向异性的湿法腐蚀工艺来说，其腐蚀速率大约在 1 μm/min。而对于典型的干法刻蚀工艺来说，其刻蚀速率大概只有 0.1 μm/min 左右。遗憾的是，湿法腐蚀工艺也有几点不足之处：由于溶液的流动特性以及其中所含的气泡常常会导致腐蚀的表面质量很差；对于某些特定材料的衬底，例如氮化硅材料，目前尚无特别有效的湿法腐蚀方法。

8.9.2　等离子体刻蚀

用于干法刻蚀工艺的等离子体通常是稀释于惰性载气(例如氩气)中的某种元素带正电荷的离子和大量电子的混合体。等离子体可以通过持续施加高压电场或射频电源来产生。通常是在低气压的环境或真空中产生等离子体。

如图 8.18 所示，包含气体分子、自由电子和气体离子的高能量等离子体轰击目标衬底的表面，并将衬底材料从其表面撞击出来。这项工艺就像是溅射工艺的反向过程一样，只是其工艺温度比较低，一般介于 50～100℃之间，并且通常是在高真空的情况下进行的。

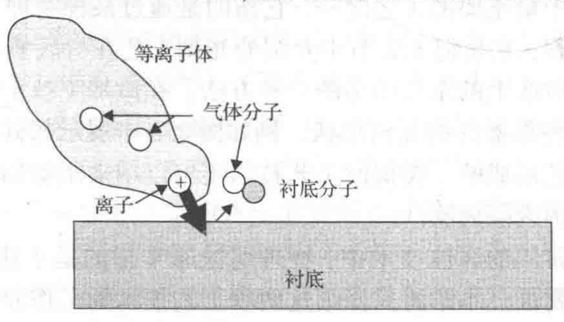


图 8.18　等离子体辅助的干法刻蚀

8.10　微加工技术小结

本章对各种可用于 MEMS 和微系统的微加工技术做了一个概括性的介绍。这些工艺技术可以用来制造大多数微器件和微系统中的主要三维几何结构。

除了特殊的 LIGA 微加工技术(我们将在第 9 章中介绍该方法)之外，大多数硅基 MEMS 和微系统都是通过在硅衬底上添加各种薄膜材料，或者通过从硅衬底上去除某些部分而形成的。

要在硅衬底上增加材料，最常用的一种工艺技术就是化学气相淀积(CVD)技术。首先把要淀积的材料(也称作反应物)在某种特定的载气中稀释，然后把气体和反应物的混合物通入到放置了衬底的反应器中。反应物通过扩散和化学反应的组合作用淀积在衬底表面。还有一个类似的工艺称为外延淀积，它主要用于在衬底表面淀积相同材料的反应物薄膜，该工艺广泛应用于在硅衬底的表面淀积硅晶体薄膜。另外一种淀积技术称为物理淀积或溅射，它是利用射频(RF)源产生的等离子体来轰击要淀积的金属材料，从而实现在硅衬底表面淀积各种金属薄膜。

从衬底上去除部分硅材料也能形成 MEMS 器件所需要的三维几何结构。能够用于此目的的主要工艺步骤就是腐蚀工艺。在微制造技术中，通常有两种类型的腐蚀工艺，即干法刻蚀工艺和湿法腐蚀工艺。前者主要利用等离子体的刻蚀作用来去除局部区域的材料，而湿法腐蚀则是利用化学反应来将衬底上的部分材料溶解掉。干法刻蚀去除材料的速率较慢，但是它通常具有较好的图形边沿控制精度。设计工程师们可以根据其设计的 MEMS 产品的具体需求来选择合适的腐蚀工艺。

在所有的微制造工艺中，各种元器件的几何形状都是通过适当的掩模板来定义和控制的，而掩模板也是由光刻工艺来制备的。掩模板上的图形通常是在宏观的大尺度下设计出来的，然后通过光学缩小的步骤将其缩小到所需的微观尺度。接下来将缩小后的微尺度图形投射到涂有光刻胶的掩模板基片上，然后通过一个类似于曝光显影的过程就可以在掩模板基片表面形成永久的图形；最后通过腐蚀工艺去除掩模板基片上不需要的部分掩模材料，就可以得到制作好的掩模板。

微制造工艺还包括通过离子注入、扩散和氧化等工艺来控制局部区域材料的性质和特点。离子注入和扩散工艺经常用来对硅晶圆片上某些选定的区域或者整个硅晶圆片进行掺杂，以便改变其电导特性。这些工艺可以用来制备大多数微型传感器中用于信号转换的压敏电阻。

本章习题

第一部分：多项选择

1. 微制造技术是专门为制作________尺度的形状结构而开发的。

   (1)宏观；(2)介观；(3)微观

2. 已经建立起来的微制造技术主要包括________方法。

   (1)机械电子；(2)电化学；(3)物理-化学

3. 净化级别为 1000 级的洁净室定义为在 1 立方________空气中所含尺度小于 0.5 μm 的尘埃粒子少于 1000 个。

   (1)英寸；(2)英尺；(3)米

4. 定义洁净室内空气质量的尘埃粒子尺寸为________。
(1)0.05 μm；(2)0.5 μm；(3)5 μm
5. 洁净室的净化级别越高，意味着室内的空气________。
(1)越洁净；(2)越脏；(3)既不更洁净，也不更脏
6. 在典型的郊外环境中，空气质量等同于________级的洁净室。
(1)50 000；(2)500 000；(3)5 000 000
7. 在微制造技术中之所以要应用光刻工艺，是因为我们需要________。
(1)给微器件照相；(2)在衬底上形成微尺度的图形；(3)形成微尺度的图片
8. 曝光之后可以溶解在显影液中的光刻胶是________。
(1)正性胶；(2)负性胶；(3)正性胶或负性胶
9. 与使用负性胶相比，光刻工艺中使用正性胶将导致________的效果。
(1)更好；(2)更差；(3)大致相同
10. 在光刻工艺中，光刻胶的典型厚度为________。
(1)0.1 ~1.0 μm；(2)0.5 ~2.0 μm；(3)1 ~2 μm
11. 光刻工艺中常用的曝光光源的波长范围是________。
(1)100 ~300 nm；(2)300 ~500 nm；(3)500 ~700 nm
12. 与负性胶相比，正性胶的显影过程________。
(1)更加复杂；(2)比较简单；(3)差不多同样复杂
13. 离子注入是________常用的半导体掺杂技术之一。
(1)两种；(2)三种；(3)四种
14. 离子注入是通过________的方式在硅衬底中引入其他的物质。
(1)熔化；(2)强力打入；(3)缓慢扩散
15. 离子注入工艺通常在________进行。
(1)高温下；(2)室温下；(3)低温下
16. 常用的离子注入能源包括________。
(1)离子束；(2)强加热；(3)高能电磁场
17. 注入的外来物质在衬底中呈现出________。
(1)浓度的均匀分布；(2)浓度的非均匀分布，且靠近表面处浓度低；(3)依赖于工艺温度的浓度分布
18. 扩散工艺也可以用于对半导体衬底进行掺杂，与离子注入工艺相比，它的掺杂速率________。
(1)较慢；(2)较快；(3)基本相当
19. 扩散工艺通常在________进行。
(1)高温下；(2)室温下；(3)低温下
20. 扩散进来的外来物质在衬底中呈现出________。
(1)浓度的均匀分布；(2)浓度的非均匀分布，且靠近表面处浓度最高；(3)依赖于工艺温度的浓度分布
21. 扩散工艺过程中的数学模型是基于________。
(1)傅里叶(Fourier)定律；(2)牛顿(Newton)定律；(3)菲克(Fick)定律
22. 硅的湿氧氧化工艺经常被优先采用，这是因为其________。
(1)形成的 SiO_2 质量较好；(2)具有较快的氧化速率；(3)工艺成本低
23. 硅衬底的氧化是________。
(1)为了保护衬底表面；(2)局部电绝缘和热隔离的需要；(3)一个不可避免的现象
24. 热氧化的动力学理论主要用来评估硅衬底上二氧化硅层的________。
(1)生长情况；(2)腐蚀情况；(3)镀膜情况
25. 1 Torr 等于________的压强。
(1)1 英寸水柱；(2)1 厘米汞柱；(3)1 毫米汞柱

26. 在白光照射下，硅氧化层的颜色可以反映________特定氧化层的厚度。
(1)一种；(2)两种；(3)几种
27. 在微制造技术中，能够采用淀积工艺在衬底上淀积的________。
(1)仅仅是有机物材料；(2)仅仅是无机物材料；(3)可以是任何材料
28. 在微电子技术和微加工技术中，通常有________淀积方法。
(1)两种；(2)三种；(3)四种
29. 采用 CVD 工艺在硅衬底上淀积其他物质是一种非常有效的方法，因为这种工艺________。
(1)是热激发的；(2)综合利用了机械作用和化学扩散；(3)综合利用了热扩散和化学反应
30. 在 CVD 工艺中，几个必不可少的组成要素是________。
(1)等离子体和化学反应物；(2)载气和化学反应物；(3)化学反应物和带电离子
31. 要进行 CVD 工艺，要求衬底表面是________。
(1)冷的；(2)适当加热的；(3)非常热的
32. 要改善 CVD 工艺的质量，可以通过在工艺中________来获得。
(1)增大压强；(2)减小压强；(3)保持高的恒定压强
33. 在 CVD 工艺中，流动的载气和衬底表面之间形成的边界层会使 CVD 工艺的淀积速率________。
(1)降低；(2)提高；(3)不受影响
34. 在 CVD 工艺中，随着载气流速的减小，边界层的厚度将会________。
(1)增大；(2)减小；(3)保持恒定
35. 阿伏伽德罗常数 6.022×10^{23} 被定义为 1 摩尔任何气体中的________。
(1)电子数；(2)原子数；(3)分子数
36. CVD 工艺的淀积速率与温度________。
(1)成正比；(2)成反比；(3)无关
37. CVD 工艺的淀积速率与载气的压强________。
(1)成正比；(2)成反比；(3)无关
38. CVD 工艺的淀积速率与载气的流速________。
(1)成正比；(2)成反比；(3)无关
39. CVD 工艺的淀积速率与载气和衬底表面之间的边界层厚度________。
(1)成正比；(2)成反比；(3)无关
40. PECVD 工艺之所以很常用，是因为它提供了________。
(1)较好的粘附性；(2)一个较简单的工艺过程；(3)比较低的工艺温度
41. 为实现较低的工艺温度，工艺工程师们将会选择________工艺。
(1)APCVD；(2)LPCVD；(3)PECVD
42. 为实现较高的淀积速率，工艺工程师们将会选择________工艺。
(1)APCVD；(2)LPCVD；(3)PECVD
43. 溅射工艺是一种________工艺。
(1)低温；(2)升温；(3)高温
44. 溅射工艺通常用于在硅衬底上淀积________。
(1)有机物薄膜；(2)无机物薄膜；(3)金属薄膜
45. 外延工艺涉及到在衬底上生长同样材料的________。
(1)单晶薄膜；(2)有机物薄膜；(3)金属薄膜
46. CMOS 技术是一个________。
(1)CVD 工艺；(2)PVD 工艺；(3)外延薄膜生长工艺
47. 外延淀积工艺中常用的载气为________。
(1)氧气；(2)氮气；(3)氢气

48. 湿法腐蚀工艺涉及到采用________来溶解希望去除掉的材料。
(1)蒸馏水；(2)矿泉水；(3)化学溶液
49. 干法刻蚀工艺涉及到采用________来去除部分衬底材料。
(1)干燥空气；(2)干燥毒气；(3)等离子体
50. 一般说来，要在硅衬底上去除某些材料，使用湿法腐蚀工艺的速率要比干法刻蚀快________。
(1)10 倍；(2)100 倍；(3)1000 倍

第二部分：计算题

1. 假设以 30 keV 的能量注入磷，重新求解例题 8.1。
2. 将掺杂剂改为磷和砷，重新求解例题 8.1。如果采用离子注入方式对硅衬底进行掺杂，根据计算结果你会得出硼、磷、砷这 3 种常用的掺杂剂各自具有什么样的相对优点？
3. 假设扩散温度介于 800℃至 1100℃之间，重新求解例题 8.2，从这个练习的结果中你观察到了什么样的现象或结论？
4. 在例题 8.2 中，试估算当衬底表面下方 0.2 μm 处达到掺杂剂浓度时所需的扩散时间。
5. 在例题 8.3 中，试估算采用湿氧氧化或干氧氧化工艺在硅衬底表面生长 1 μm 厚的 SiO_2 层，分别需要多长时间。
6. 某个 CVD 工艺中采用氢气将反应物稀释到 1% 的浓度，并在 800℃的温度下在硅衬底上淀积二氧化硅薄膜，使用的卧式反应器直径为 20 cm，放置硅衬底的托盘长 20 cm，反应器中压强的变化可以忽略，其他条件与例题 8.5 中给定的条件完全相同，试求解下列问题：
(a)1 立方米混合气体中包含的分子数。
(b)混合气体的摩尔浓度。
(c)气体流动的雷诺数。
(d)衬底表面的边界层厚度。
(e)带有反应物的载气在硅衬底中的扩散系数。
(f)表面反应速率。
(g)薄膜的淀积速率。
7. 在上一题(计算题 6)中所给定的条件下，试求出在硅衬底上淀积 0.5 μm 厚的薄膜所需要的时间。
8. 在计算题 6 中，如果将工艺温度降低到 490℃，薄膜的淀积速率将是多少？
9. 在计算题 6 中，如果将工艺压强降为 1 Torr，薄膜的淀积速率将是多少？
10. 在计算题 6 中，如果将载气的流速降为 25 mm/s，薄膜的淀积速率将是多少？

第9章 微制造概述

9.1 引言

对于机械工程师们来说，要制造出一件产品，主要的任务是要正确地选择和应用合适的制造技术，例如切削、钻孔、铣削、锻造、焊接、铸造、模制、冲压和拼接等。我们很快就会认识到上述这些传统的制造技术都不能用来制造 MEMS 和微系统产品，因为这类产品的尺寸极其微小。当然也有一些传统的制造工艺能够应用于 MEMS 及微系统产品的封装技术中。

上一章中所介绍的微制造技术都是与工艺细节紧密相关的。在这一章中我们将学习如何将这些制造工艺单独或组合应用于各种 MEMS 和微系统产品的制造过程中，这些 MEMS 和微系统产品包括第 2 章中介绍的微型传感器、加速度计、致动器等。而用来生产制造这些产品的技术就称为微加工技术或微制造技术。

一般说来，目前在产业界应用的微加工技术主要有 3 种：(1)体硅微制造技术；(2)表面微加工技术；(3)LIGA 工艺。LIGA 这个缩写词是德语中光刻、电铸和注塑 3 个名词的首字母缩略词。近年来在有关微加工技术以及利用上述 3 种微制造技术生产各种 MEMS 产品方面，已经发表了大量优秀的论文[O'Connor, 1992；Bryzek 等人，1994；Pottenger 等人，1997]。

在近年来开发的其他几种工艺相关的微加工技术中，激光打孔和激光切削看起来是两项很受欢迎的技术。但是我们在本章中还是要重点介绍前面提到的 3 种主要的微制造技术。

9.2 体硅微制造技术

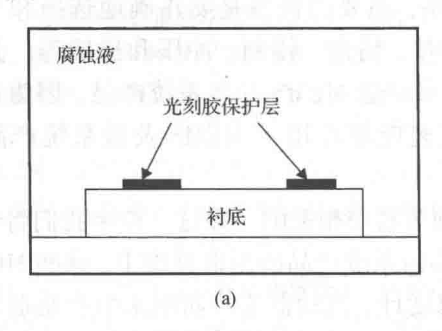
体硅微制造技术已经广泛应用于微型传感器和微加速度计的生产上。它最早是在 20 世纪 60 年代应用于微电子学领域，后来得到进一步改进，并在 20 世纪 70 年代逐渐发展成为三维结构的制造技术。

体硅微制造或微加工技术涉及到从体衬底(通常是硅晶圆片)上去除一部分材料，从而形成所需要的三维几何微结构。因此这项技术与雕刻家的雕刻成型技术非常相似，手工的微雕刻在很早以前就已经做得很好，并且在中国古代历史中都有很详细的记载。例如在 1737 年就有一个微雕刻家在一个比 1 cm 稍长的橄榄核上雕刻出了一幅栩栩如生的画面，上面有一个著名的中国诗人和他的朋友在一艘小船上喝茶，边上还有两个仆人，这个小雕刻品目前陈列在台北的帝国艺术博物馆中。在中国还有类似的微雕刻作品陈列在其他的博物馆里。然而，所有这些雕刻作品都是手工制作的，不是工业化的产品，而且加工的材料也仅限于硬木。而要在诸如硅这样的坚硬材料上制造出典型尺寸介于0.1 μm 到1 mm 之间的微系统部件，则根本就没有任何现成的机械加工手段可以使用。只有采用物理或化学手段，即通过干法刻蚀技术或者通过湿法腐蚀工艺，才是唯一实际可行的解决方法。正如我们在第 8 章中所述，包

括硅、碳化硅、砷化硅以及石英在内的各种衬底材料都可以采用这种方法来进行处理。因此腐蚀技术，无论是与方向无关的各向同性腐蚀工艺，还是与方向有关的各向异性腐蚀工艺，都是应用于体硅微制造技术的关键工艺。

9.2.1　腐蚀工艺概述

在这一节中，我们将要讨论湿法(化学)腐蚀工艺。我们在第8章8.9节中已经了解到，腐蚀工艺涉及到将表面局部覆盖有掩蔽保护层的衬底放入到化学腐蚀液中进行腐蚀，如图9.1(a)所示。



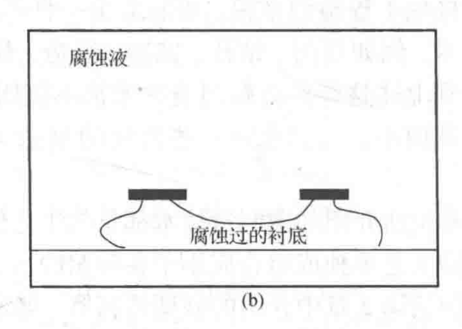


图9.1　衬底的湿法化学腐蚀：(a)湿法腐蚀中的衬底；(b)部分腐蚀掉的衬底

衬底上没有被掩蔽保护层覆盖处的部分材料就被腐蚀液溶解去除掉了，而且正如我们从图9.1(b)中所看到的那样，在经过相当长时间的腐蚀之后，腐蚀液的横向钻蚀特性会使得掩蔽保护层下面被覆盖的那部分衬底受到腐蚀作用。此外，掩蔽变化层本身也会受到腐蚀液的腐蚀作用。

9.2.2　各向同性腐蚀与各向异性腐蚀

对于材质均匀并且是各向同性的衬底来说，化学腐蚀剂会沿着材料的各个方向均匀地腐蚀，如图9.1(b)所示。这种与方向无关的腐蚀作用就称为各向同性腐蚀。

由于对最终所形成部件的几何形状缺少有效的控制能力，因此各向同性腐蚀工艺在微加工制造中几乎很难满足人们的要求。所幸的是，正如我们在第7章中所述，绝大多数衬底材料从晶体结构上看都不具有各向同性特点。举例来说，硅材料就是金刚石立方晶体结构。因此晶体沿着某些晶向的强度要比沿着其他晶向的强度更高，因而沿着这些晶向的抗腐蚀能力也就更强。我们在第7章中还了解到，硅晶体的3个晶面在微加工过程中是具有特殊的重要性的，这3个晶面分别是(100)、(110)和(111)晶面，如图9.2所示。

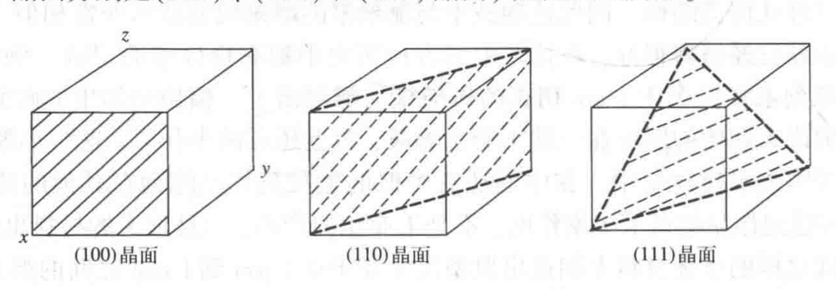


图9.2　硅晶体中的3个主平面

<100>、<110>和<111>晶向分别代表的是(100)、(110)、(111)这3个晶面的法线方向。在集成电路工业中最常用的是<100>、<111>这两个晶向，而<110>晶向则是微加工制造中最偏爱的晶向。这是因为晶圆片沿着该晶向比沿着其他晶向更容易被干净地打破和裂解。(110)晶面是唯一可以在垂直界面上裂解晶体的晶面，而(111)晶面则是最牢固的晶面，因此<111>晶向也是微加工过程中最少用到的晶向。这种沿着不同晶向不一致的机械强度也反映出其易于被腐蚀程度的不同。很显然，材料沿着(111)晶面上是最难被腐蚀的。硅材料沿着<100>晶向与沿着<111>晶向的腐蚀速率之比就有可能达到400:1的比例。

参考图7.5和图7.7中展示的硅晶体中的原子排列情况，可以看到，(111)晶面和(100)晶面之间的夹角为54.74°[Bean, 1978]。因此，当放置于腐蚀液中的晶圆片表面恰为(100)晶面时，我们就会看到在不同的晶向上将呈现出不同的腐蚀速率。腐蚀完毕后，就会出现一个侧壁坡度为54.74°的棱锥形腔体[Angell 等人, 1983]，如图9.3所示。

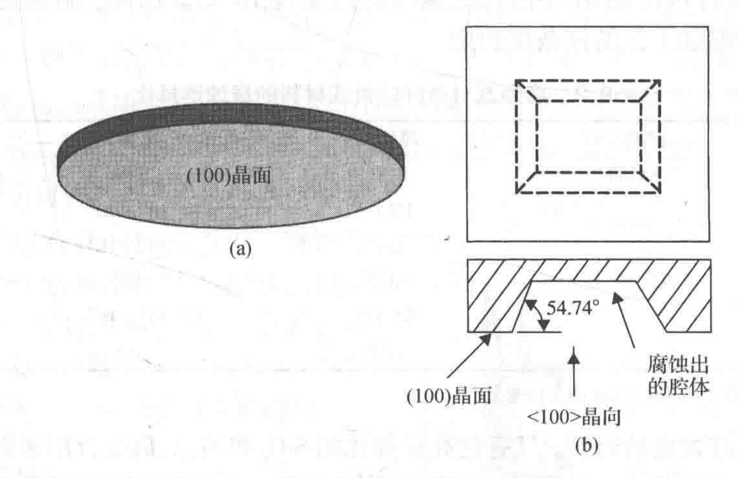


图9.3　硅衬底的各向异性腐蚀：(a)未腐蚀的晶圆片；(b)沿着<100>晶向腐蚀的晶圆片

尽管各向异性腐蚀在控制腐蚀衬底的几何形状上有许多优点，但是它也存在几点不足：(1)其腐蚀速率比各向同性腐蚀要慢，一般很少能够超过1 μm/min；(2)腐蚀速率受温度的影响非常敏感；(3)在腐蚀过程中通常需要将温度升高到100℃左右，这就会影响到许多光刻胶作为掩蔽保护层的使用。

9.2.3　湿法腐蚀剂

有很多不同类型的腐蚀剂可以用来腐蚀不同的衬底材料。我们把经常用来腐蚀硅的各向同性腐蚀剂称为HNA，它代表酸性溶液，比如$HF/HNO_3/CH_3COOH$。这类腐蚀剂在室温下使用起来非常有效。另一方面，那些pH值大于12的碱性化学溶液，则经常用于各向异性腐蚀工艺。硅晶体材料常用的各向异性腐蚀剂包括氢氧化钾(KOH)、乙二胺和邻苯二酚(EDP)、四甲基氢氧化铵(TMAH)以及联氨等。大多数基于上述化学腐蚀剂的腐蚀液通常都是按照1:1的重量比用水来稀释的。表9.1给出了用上述几类腐蚀剂来腐蚀各种常规衬底材料的腐蚀速率范围[Wise, 1991; Kovacs, 1998]。

表9.1 硅及硅的化合物典型的腐蚀速率

材料	腐蚀剂	腐蚀速率
硅沿着<100>晶向	KOH	0.25 ~ 1.4 μm/min
	EDP	0.75 μm/min
二氧化硅	KOH	40 ~ 80 nm/h
	EDP	12 nm/h
氮化硅	KOH	5 nm/h
	EDP	6 nm/h

从表9.1中可以看出，用KOH腐蚀SiO_2的腐蚀速率比腐蚀硅的腐蚀速率要慢1000倍，而用KOH腐蚀Si_3N_4的腐蚀速率则比腐蚀SiO_2还要再慢一个数量级。表9.2给出了几种腐蚀剂对于不同衬底材料的腐蚀选择比。所谓选择比是指在使用同一种腐蚀剂的前提下，硅材料与另外一种材料的腐蚀速率之比。举例说来，在表9.2中，SiO_2在KOH溶液中的选择比为10^3，即意味着这种材料在KOH中的腐蚀速率比硅要慢10^3倍。因此，腐蚀选择比越高的材料，越适合用来做腐蚀工艺的掩蔽保护层。

表9.2 腐蚀剂对两种硅衬底材料的腐蚀选择比

衬底	腐蚀剂	选择比
二氧化硅	KOH	10^3
	TMAH	$10^3 \sim 10^4$
	EDP	$10^3 \sim 10^4$
氮化硅	KOH	10^4
	TMAH	$10^3 \sim 10^4$
	EDP	10^4

资料来源：[Kovacs, 1998]。

因此，在腐蚀硅衬底的时候，具有较高选择比的SiO_2和Si_3N_4最适合用来做掩蔽保护层的材料。为了避免出现如图9.4所示的欠腐蚀和钻蚀现象，必须严格控制好腐蚀时间以及在衬底表面腐蚀剂的搅拌流动方式。

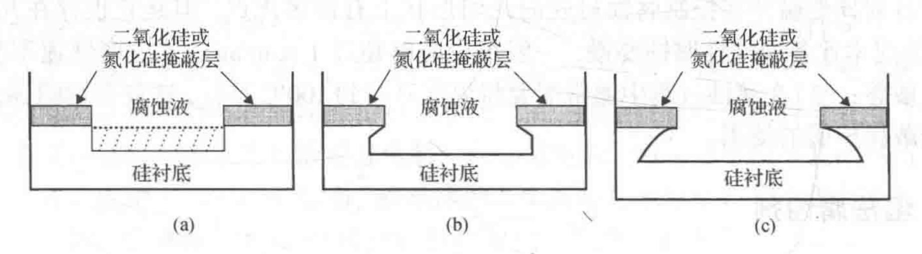


图9.4 腐蚀形状的定义：(a)理想腐蚀情况；(b)欠腐蚀；(c)钻蚀

在腐蚀工艺中，还要特别注意掩蔽保护层材料的选取。当利用KOH腐蚀剂在硅衬底上腐蚀一个中等深度的凹槽时，通常选择SiO_2层作为掩蔽保护层。在腐蚀工艺中，SiO_2掩蔽保护层的制造成本相对比较低廉。然而即使腐蚀速率比较缓慢，但是若将整个系统长时间地放置在腐蚀溶液中(例如在腐蚀深槽的过程中)，SiO_2掩蔽保护层也会受到腐蚀剂的侵蚀。在这种情况下，就要选择Si_3N_4薄膜作为掩蔽保护层的材料了。

要控制被腐蚀硅衬底的形状，并获得清晰和精准的边界定义精度，最有效的解决办法是采用下面将要介绍的自停止腐蚀技术。

9.2.4　自停止腐蚀

目前有两种常用的自停止腐蚀技术：(1)掺杂控制的自停止腐蚀技术；(2)电化学自停止腐蚀技术。

掺杂控制的自停止腐蚀技术　有一种特殊的现象可以用来控制腐蚀硅的工艺过程：无论是掺杂了硼的 P 型硅材料，还是掺杂了磷或砷的 N 型硅材料，它们的腐蚀速率都与纯净的硅材料有所不同。当使用各向同性的 HNA 腐蚀剂时，P 型掺杂或 N 型掺杂区域的溶解速度要比非掺杂区域快得多。HNA 腐蚀液是一种由氢氟酸、硝酸和醋酸组成的混合物。但是当硅中掺杂过量的硼以提高腐蚀速率时，也会引起硅晶格的畸变，由此导致材料中产生不希望有的内部(残余)应力。

电化学自停止腐蚀技术　这种技术在控制各向异性腐蚀方面应用得十分普遍。如图 9.5 所示，首先在硅晶圆片上通过扩散工艺形成一个低掺杂浓度的 PN 结，N 型区磷掺杂的浓度为 $10^{15}/cm^3$，P 型区中硼掺杂得到的电阻率为 30 Ω · cm(可以参考图 3.8 得到相应的掺杂浓度)。将掺杂后的硅衬底放置在诸如蓝宝石这样的惰性材料制成的衬底夹持器上。然后将 N 型硅层作为一个电极连接到一个带有恒定电压源的电解系统中，如图 9.5 所示[Madou，1997]。

从图 9.5 中可以观察到，未被掩蔽层保护的 P 型衬底部分浸没在腐蚀液当中。腐蚀作用一直进行到 PN 结界面处才会停止，因为 P 型硅和 N 型硅的腐蚀速率不同，因此只要在掺杂硅衬底的时候控制好 PN 结的界面深度，就可以非常有效地控制腐蚀硅衬底的深度。

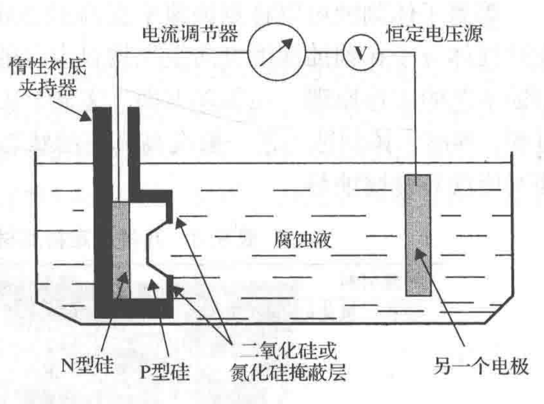


图 9.5　电化学自停止腐蚀的装置示意图

9.2.5　干法刻蚀

干法刻蚀是利用气态腐蚀剂来去除衬底材料，而不是利用化学腐蚀液和清洗方法来进行腐蚀。目前有 3 种常用的干法刻蚀技术：等离子体刻蚀、离子研磨(离子铣)以及反应离子刻蚀(RIE)[van Zant，1997]。本节将主要讨论等离子体刻蚀技术以及一种相关的新技术——深层反应离子刻蚀(DRIE)技术。

等离子体刻蚀：我们在第 3 章中已经了解到，等离子体是一种包含大量自由电子和正离子的中性离化气体。通常采用射频源作为激发等离子体的能源。这个工艺过程涉及到向等离子体中加入某种化学反应性气体(例如 $CC\ell_2F_2$)，其中的等离子体则是包含有大量离子及其载气(通常是惰性气体，如氩气)的混合气体。如图 9.6 所示，反应性气体在等离子体中被离化之后会产生出大量的反应性中性粒子。这些反应性中性粒子能够轰击目标的侧壁和正表面，而带电的离子则只能轰击衬底的正表面。等离子体中的高能离子对衬底表面的轰击，再加上反应性中性粒子与衬底材料之间的化学反应，二者的共同作用实现了对衬底材料的刻蚀。这种高能量的反应会引起局部的蒸发，从而导致衬底材料的去除。可以设想，在深度方向的刻蚀正面，衬底材料的腐蚀速率要比沿着侧壁方向的腐蚀速率更快。这是因为大量的高

能粒子在轰击正表面时，中性粒子和带电离子都会起作用，而在轰击侧壁时，仅仅是反应性的中性粒子在起作用。

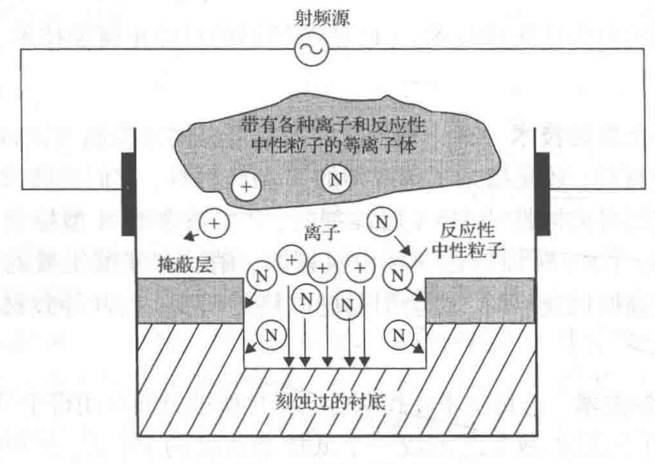


图9.6　等离子体刻蚀

传统的干法刻蚀工艺是一个非常缓慢的过程，其刻蚀速率只有大约 0.1 μm/min 或 1000 Å/min[①]。

等离子体刻蚀可以将刻蚀速率提高到 2000 Å/min 左右。刻蚀速率的提高主要得益于反应性气体分子在刻蚀深度方向上平均自由程的提高。我们在 8.9.2 节中已经阐述了等离子体刻蚀工艺的工作原理。在很多方面，这个干法刻蚀工艺过程也可以被看作是一个相反的溅射过程，等离子体刻蚀工艺一般在高真空的状态下进行。表 9.3 中列举了与所选定的衬底材料相对应的各种腐蚀剂。

表 9.3　几种选定衬底材料的等离子体气态腐蚀剂

衬底材料	常规化学药品	新化学药品
硅和二氧化硅(SiO_2)	CCl_2F_2	CCl_2F_2
	CF_4	CHF_2/CF_4
	C_2F_6	CHF_3/O_2
	C_3F_8	CH_2CHF_2
氮化硅(Si_3N_4)	CCl_2F_2	CF_4/O_2
	CHF_3	CF_4/H_2
		CHF_3
		CH_3CHF_2
多晶硅	Cl_2 或 BCl_3/CCl_4	$SiCl_4/Cl_2$
	Cl_2 或 BCl_3/CF_4	BCl_2/Cl_2
	Cl_2 或 $BCl_3/CHCl_3$	$HBr/Cl_2/O_2$
	Cl_2 或 BCl_3/CHF_3	HBr/O_2
		Br_2/SF_6
		SF_6
		CF_4
砷化镓(GaAs)	CCl_2F_2	$SiCl_4/SF_6$
		$SiCl_4/HF_3$
		$SiCl_4/CF_4$

资料来源：[Van Zant, 1997]。

① 此处原文误为 100 Å/min。——译者注

与湿法腐蚀相比，采用等离子体对硅衬底进行干法刻蚀具有刻蚀速率快、清洁度高等优点。典型的干法刻蚀速率为 5 μm/min，这个速率大约是湿法腐蚀的 5 倍。和湿法腐蚀一样，干法刻蚀在制备浅槽结构上也具有一定的局限性。因此无论是湿法腐蚀方法还是干法刻蚀工艺在制备具有较低深宽比的 MEMS 器件方面都受到一定的限制。MEMS 器件的深宽比(A/P)是指其腐蚀深度与表面宽度尺寸之间的比值。对于干法刻蚀工艺来说，其深宽比(A/P)一般小于 15。干法刻蚀工艺的另一个缺点是衬底表面会受到刻蚀残余物的污染。

深层反应离子刻蚀(DRIE)：尽管使用等离子体刻蚀可以显著地提高刻蚀速率，同时也可以增大刻蚀沟槽或空腔的深度，但是沟槽的内壁相对于深度方向上仍然存在一个广角 θ，如图 9.7 所示。这个腔壁的夹角对于许多 MEMS 结构来说是一个非常关键的问题，例如图 9.8 所示的微型谐振器中的平板电极和平板弹簧。这些结构要求电极的各相对面或者插指之间互相平行，如图 9.8(a)所示，也要求平板弹簧的每个叶片之间相互平行，如图 9.8(b)所示。通过刻蚀工艺形成了许多这样的梳状电极。为了有效地隔离这些电极，必须在深槽刻蚀过程中尽可能使得 θ 角保持在最小值。长期以来获得带有垂直侧壁的深槽已经成为制约体硅微制造技术发展的主要障碍。因此体硅微制造技术一直被普遍认为只适合于用来制造具有较低深宽比的 MEMS 器件，在很多情况下也就是用来制造具有锥形腔体的 MEMS 产品。

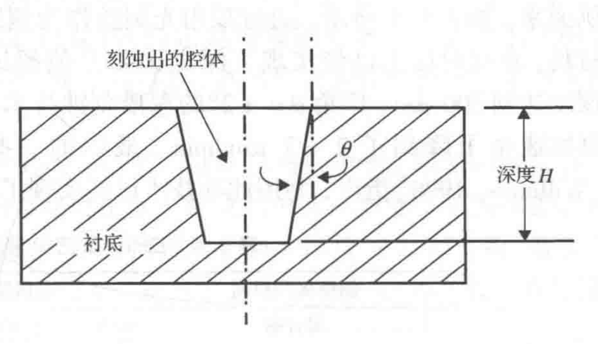
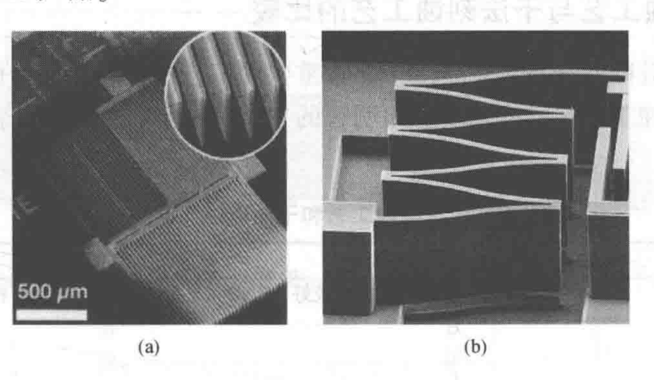


图 9.7 在刻蚀空腔过程中形成的侧壁广角



(a) (b)

图 9.8 MEMS 中具有较高深宽比的平板部件：(a)平板电极；(b)平板弹簧(资料来源[Kovacs, 1998])

深层反应离子刻蚀(DRIE)工艺可以克服上述不足。DRIE 工艺已经扩展了体硅微制造技术的应用范围，使其能够生产出具有较高深宽比的 MEMS 产品，并且其腔壁几乎完全垂直，即 $\theta \approx 0$。

DRIE 工艺过程与干法等离子体刻蚀工艺的不同之处在于，DRIE 工艺在刻蚀过程中能够在刻蚀的侧壁上形成几微米厚的保护薄膜。如图 9.9 所示，它是利用高密度的等离子源，可以使衬底材料的等离子体刻蚀过程与在侧壁上淀积刻蚀保护材料的过程交替进行。适合用来作为刻蚀保护材料(图中的黑线所示)都是具有较高的刻蚀选择比的材料，例如表 9.2 中所列

的 SiO_2等材料，聚合物也经常被用作刻蚀过程中的侧壁保护材料。诸如光致抗蚀剂这样的聚合物材料则是在等离子体刻蚀过程中通过聚合作用形成的。

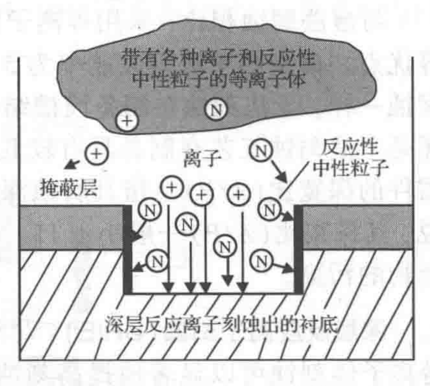


图 9.9　深层反应离子刻蚀工艺

将带有聚合物侧壁保护层的 DRIE 工艺用来制作深宽比达到 $A/P = 30$、实际侧壁广角达到 $\theta = \pm 2°$ 的 MEMS 结构已经有好几年了。近年来研究人员通过改进侧壁保护材料的性能已经大大提高了 DRIE 的水平。举例说来，如表 9.4 所示，通过采用光刻胶作为侧壁保护材料，在硅衬底上已经实现了深宽比 A/P 值超过 100、深度达到 300 μm、广角 $\theta = \pm 2°$ 的深槽刻蚀技术，但是刻蚀速率下降到了 2 ~ 3 μm/min。最近的一些报道[Williams, 1998]指出，利用此项技术已经实现了深度为 380 μm 的深槽刻蚀。

表 9.4　DRIE 工艺中常用的侧壁保护材料

侧壁保护材料	刻蚀选择比	深宽比(A/P)
聚合物		30:1
光刻胶	50:1	100:1
二氧化硅	120:1	200:1

有许多刻蚀气体可以应用于 DRIE 工艺，其中包括在氩气等离子体中混有氟的聚合物(nCF_2)。这种刻蚀气体在刻蚀过程中能够在侧壁上形成一层聚合保护薄膜，其刻蚀速率在 2 ~ 3 μm/min 范围内，高于湿法腐蚀的速率。刻蚀选择比高达 100 的光刻胶和刻蚀选择比高达 200 的 SiO_2也已经有了报道。

9.2.6　湿法腐蚀工艺与干法刻蚀工艺的比较

腐蚀工艺在体硅微制造技术中是一个非常重要的工艺过程。在体硅微制造中，工程师们对于选择哪一种腐蚀工艺技术必须要做出明智的判断。基于这个目的，表 9.5 给出了一个非常有用的参考。

表 9.5　湿法腐蚀工艺和干法刻蚀工艺的对比

参数	干法刻蚀	湿法腐蚀
方向性	对大多数材料较好	仅对单晶材料(深宽比可达 100)
生产自动化程度	好	差
环境影响	低	高
掩蔽薄膜的粘附性	不太关键	非常关键
选择性	差	很好
待腐蚀材料	仅对某些特定材料	所有材料
工艺扩展性	较难	容易
清洁度	特定条件下的洁净	好至很好
关键尺寸控制	非常好(<0.1 μm)	差
设备成本	昂贵	不太昂贵
典型腐蚀速率	慢(0.1 μm/min)到快(6 μm/min)	快(1 μm/min 以上)
操作参数	多	少
腐蚀速率控制	低刻蚀速率下控制较好	较难控制

资料来源：[Madou, 1997]。

9.3 表面微加工技术

9.3.1 概述

相对于通过物理或化学手段来去除衬底材料的体硅微加工技术而言，表面微加工技术主要依靠在衬底表面逐层添加不同的材料来构造微结构。淀积技术，特别是第8章8.6.4节所介绍的低压化学气相淀积(LPCVD)工艺，通常被用来建立各种微结构，而多晶硅材料则是一种常用的添加层材料。牺牲层(通常由二氧化硅层构成)也是用来构造MEMS部件结构的材料，但是随后牺牲层会被去除掉，以便在深度(也就是厚度)方向形成必要的空间。通常采用湿法腐蚀工艺来达到去除牺牲层的目的。

于是我们将会看到，尽管在很多情况下仍然是以单晶硅作为衬底材料，但是附加层就不一定是单晶硅或硅的化合物了，因此结构的总高度也就不再受到现有的商业上可获得的晶圆片厚度的限制了。在表面微加工技术中，增加的每个薄膜层的典型厚度为2～5 μm，在某些特殊应用中，这个厚度范围还可以扩展到5～20 μm。这些添加层就是微加工技术中的薄膜。我们将会认识到采用薄膜制造的结构带来的各种问题。

图9.10展示了体硅微制造技术与表面微加工技术的区别。在图9.10(a)中我们看到了一个可以应用于微加速度计(如图2.34所示)、也可以应用于微致动器(如图2.19和图2.21所示)的微悬臂梁，该悬臂梁是由单晶硅经过腐蚀掉大量硅材料之后而形成的，如图9.11所示。该悬臂梁结构同样也可以利用表面微加工技术通过多晶硅薄膜来制作，如图9.10(b)所示。从这幅图中可以看到，表面微加工技术不仅可以节省材料，而且可以消除芯片的粘合，因为多晶硅薄膜可以直接淀积在固定基板的上面。

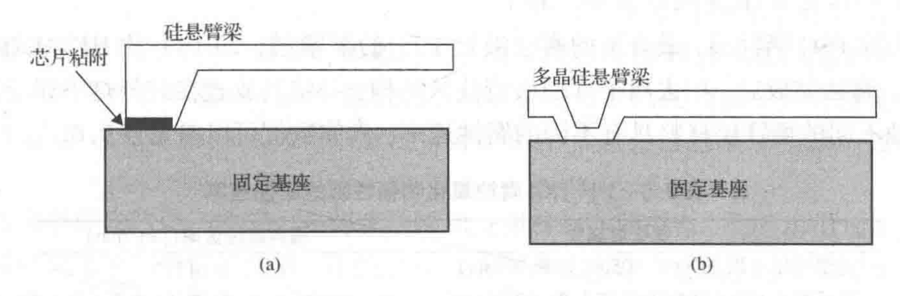


图9.10 利用两种微加工技术制作的微悬臂梁：(a)利用体硅微制造技术；(b)利用表面微加工技术

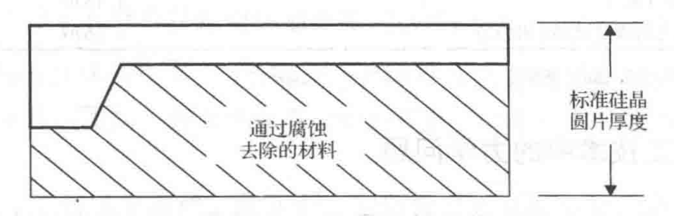


图9.11 体硅微制造技术中的材料浪费

9.3.2 工艺过程

典型的表面微加工器件通常是由3种类型的单元组成的：(1)牺牲层(也称为空隙层)单元；(2)微结构层单元；(3)绝缘层单元。

牺牲层单元通常是利用LPCVD技术将磷硅玻璃(PSG)或者SiO_2薄膜淀积在衬底上形成的。在HF腐蚀液中，磷硅玻璃(PSG)的腐蚀速率比SiO_2要快得多。牺牲层单元通常以薄膜的形式存在，其长度可以达到1~2000 μm，其厚度一般介于0.1~5 μm之间。微结构层单元和绝缘层单元也都可以通过淀积薄膜来形成。多晶硅是一种很常用的材料。牺牲层单元的腐蚀速率通常必须比其他两部分单元的腐蚀速率高得多。

图9.12展示了如何利用表面微加工技术来制作出图9.10(b)所示的微悬臂梁结构。首先第一步，将PSG淀积在硅衬底基片的表面；接下来第二步制作出覆盖在PSG表面的掩蔽层(掩模1)，通过该掩蔽层的保护腐蚀出将来供悬臂梁与衬底连接的窗口(如第三步图中所示)；第四步淀积多晶硅薄膜作为微结构材料，并通过另一张掩模(掩模2)刻蚀出微悬臂梁的图形；第五步腐蚀去除掉剩余下来的PSG薄膜，最后就形成了第六步中符合要求的微悬臂梁。最后一步腐蚀去除PSG牺牲层，最合适的腐蚀液是1:1的氢氟酸，即1:1的$HF:H_2O$+1:1的$HC\ell:H_2O$。腐蚀完成后，用去离子水彻底清洗该结构，并将其放置在红外灯下烘干。用上述腐蚀液腐蚀不同的牺牲层材料具有不同的腐蚀速率，具体数值可以参见表9.6。

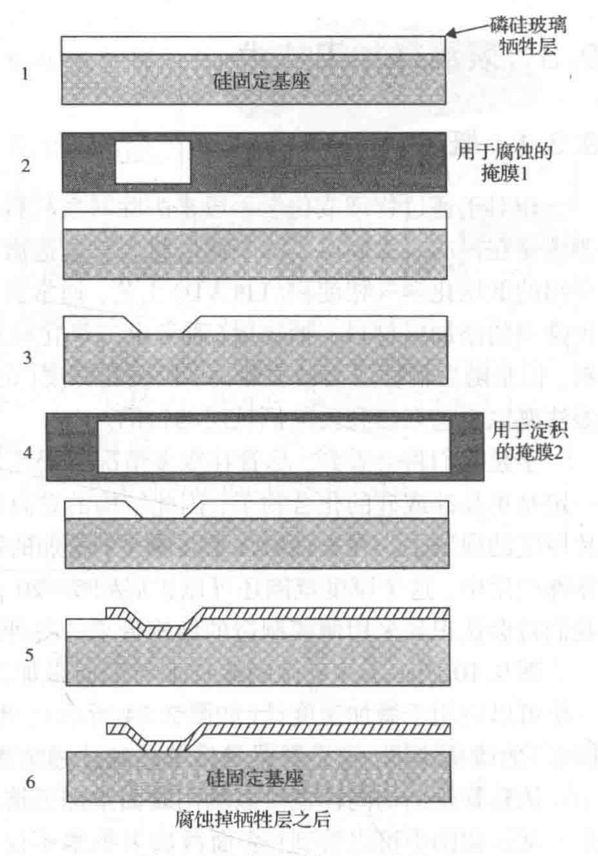


图9.12 表面微加工工艺流程

表9.6 HF/HCl腐蚀氧化物牺牲层的腐蚀速率

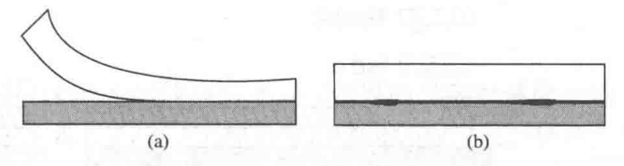
氧化层薄膜	横向腐蚀速率(μm/min)
化学气相淀积SiO_2(在1050℃致密30 min)	0.6170
离子注入SiO_2(以50 keV注入$8\times10^{15}/cm^2$)	0.8330
磷硅玻璃(PSG)	1.1330
5%/5%的硼磷硅玻璃(BPSG)	4.1670

资料来源：[Madou, 1997]。

9.3.3 表面微加工技术中的力学问题

表面微加工技术存在3个与力学特性相关的主要问题：(1)层间的粘附性；(2)界面应力；(3)粘连。

层间的粘附性：只要两层材料键合在一起，不管它们是相同的材料还是不同的材料，中间都有可能存在一个分离层。通过剥离其中的一层，或者在界面处施加一个剪切力，很容易使一个双层结构在界面处发生分离。图9.13就显示了这两种失效的情形。


图 9.13　双层材料的界面失效：(a)剥离；(b)由剪切力引起的界面断裂

在诸多引起界面失效的因素中，过热和机械应力是导致界面失效的两个最重要的原因。但是其他原因，包括表面条件(例如清洁度、粗糙度以及吸附能量等)也可以引起界面键合强度的降低。我们在 4.5.3 节中介绍的断裂力学理论可以用来估算键合结构的断裂强度。然而要想使得分析的结果有意义，首先必须获得断裂模式下的断裂韧度 K_{IC} 和剪切模式下的断裂韧度 K_{IIC}。

界面应力：在双层结构中通常有 3 种典型的应力，其中最明显的是由部件材料热膨胀系数(CTE)的失配引起的热应力。这种现象在 4.4.3 节中已经介绍过，例如我们知道硅的热膨胀系数差不多是 SiO_2 的 5 倍(参见表 7.3)，当双层结构处于非常高的工作温度时，剧烈的热应力将会使 SiO_2 薄膜层从硅衬底上脱离。表面微加工技术中形成的其他多层结构的材料组合在其键合界面处也会出现同样的情况。

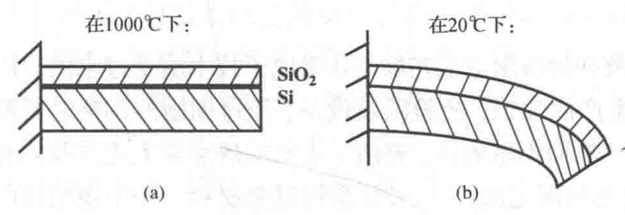


图 9.14　双层梁中的残余应力和应变：(a)氧化过程中；(b)氧化后

第二类界面应力是残余应力，它在微机械加工过程中是一种固有的应力。我们以 1000℃ 条件下在硅衬底梁表面热氧化生长的 SiO_2 层为例，如图 9.14 所示，其中的热氧化工艺在 8.5 节中已经介绍过。室温下双层梁最后呈现的形状如图 9.14(b)所示，这是因为这两种材料的热膨胀系数存在很大的差异。不难理解，当双层梁冷却到 20℃ 的室温时，与残余应变相关的是 SiO_2 层中存在显著的残余张应力。SiO_2 层中过强的残余张应力可能会导致薄膜内产生多处裂纹。[Hsu 和 Sun，1998]曾经研究并给出了压力传感器氧化膜中残余应力的分析报告。

薄膜结构中存在的第三种应力是薄膜结构本身固有的一种应力，它是由微加工过程中原子结构的局部变化所产生的。例如，在经过表面微制造工艺处理之后，过量的掺杂有可能在结构中引入较大的残余应力。工程师们对薄膜中这种固有应力的准确起因和量化评估尚不是很清楚。我们在第 4 章 4.6 节中曾经定性地介绍过这种应力。

粘连：很多人都有这样的经历，当分隔两个透明胶片的薄纸片被抽出来之后会很难分开这两个薄的胶片。在表面微加工技术中也有类似的现象，这种两个分离的薄片粘附在一起的现象就称为粘连。

粘连是表面微加工技术中最严重的问题。它通常是在从被分离的材料层中去除牺牲层时发生(即图 9.12 中的第六步)。由牺牲层支撑的薄膜结构有可能会倒塌在其他材料上。如图 9.15 所示，在去除了牺牲层 PSG 之后[如图 9.15(b)所示]，多晶硅梁可能会落在硅衬底(即固定基座)的表面上，此时就会出现粘连现象，这两种材料在接触之后就粘贴在一起。要分离这两个粘贴层，需要施加相当大的机械作用力，但是这样可能会破坏精密的微结构。粘连是表面微加工技术中产生大量废品的主要原因。

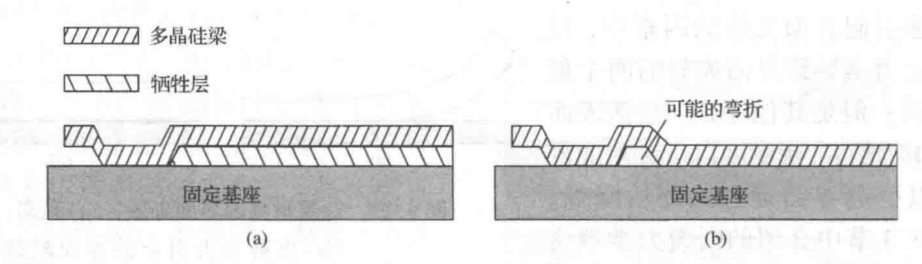


图9.15　由粘连引起薄悬臂梁的坍塌现象：(a)牺牲层尚在原位时；(b)去除牺牲层之后

据推测，粘连是在PSG牺牲层被腐蚀掉之后，清洗界面的过程中，由于表面氢键的作用而引起的，也有可能是由第3章中介绍过的范德华力而引起的。已经有不少研究者提出采用各种不同的方法来避免粘连现象[Madou，1997]。其中一项补救措施是用多晶硅和聚合物牺牲层形成临时性的隔离层，随后可以用氧等离子体将其腐蚀去除掉。无论采用何种补救措施，所需的成本和时间都是工业化生产中必须考虑的主要问题。

9.4 LIGA工艺

体硅微制造技术和表面微加工技术涉及到的微制造工艺都是从微电子技术演变过来的。因此，绝大多数用于微电子器件和集成电路生产的知识、经验以及设备，经过细微的调整之后都能够转换到MEMS与微系统产品的制造中。然而不幸的是，有两个主要的缺点使上述这些具有良好继承性的优点都黯然失色：(1)较低的几何深宽比；(2)必须使用硅基材料。一个微结构的几何深宽比就是其深度和表面宽度尺寸的比值。大多数硅基MEMS和微系统都使用标准尺寸和厚度的晶圆片作为衬底，通过在这个衬底上淀积和腐蚀薄膜材料，最终形成所需要的三维几何结构。因此微结构在深度方向的尺寸不可避免地受到限制。其他的限制因素主要来源于材料，硅基MEMS结构排斥使用聚合物、塑料以及金属等传统材料来制作微结构和其中的薄膜。

用于制造MEMS和微系统的LIGA工艺与上述两种制造技术有根本的区别。LIGA工艺没有前面提到的硅基微制造技术的两个主要缺点，它在制造非硅基微结构方面具有巨大的潜力。该工艺的一个重要特点就是能够制造出“厚”的微型结构，且该结构具有极其平坦的平行表面，例如图1.9中的微型齿轮组，图1.10所示的微马达，以及图1.11所示的微涡轮，它们都由金属或塑料构成。这些独特的优势也就是LIGA工艺在MEMS工业中获得如此广泛应用的主要原因。

LIGA是德语中的3个术语“光刻”(Lithographie)、“电镀”(Galvanoformung)和“注塑”(Abformung)的缩写，它代表了图9.16所示的工艺流程中的3个主要步骤，这项技术最早是由德国喀尔斯鲁厄市的喀尔斯鲁厄核研究中心研发出来的。

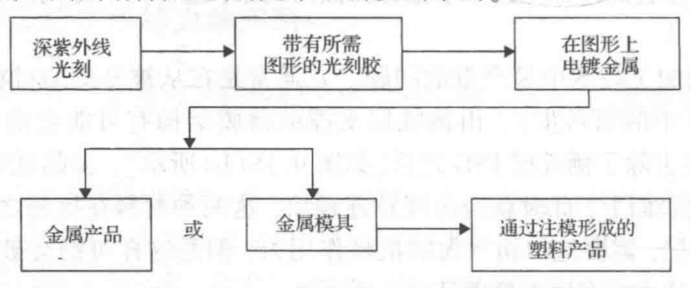


图9.16　LIGA工艺流程中的主要步骤

9.4.1 LIGA 工艺概述

如图 9.16 所示，LIGA 工艺首先要利用深层 X 射线辐射光刻在很厚的光刻胶薄膜上确定所要形成的图形。采用 X 射线作为光刻的光源是因为其波长较短，因而具有较强的穿透力来穿透较厚的光刻胶层。为了获得较高的光刻分辨率和较大的深宽比，提高穿透功率是必不可少的。X 射线的短波长可以获得 0.2 μm 的线宽和超过 100∶1 的深宽比。该工艺中所使用的 X 射线通常是由同步加速器辐射源产生的，它由于能够提供高通量的准直射线，因而可以缩短曝光时间、提高产出率。

图 9.16 中概括的 LIGA 工艺可以通过如图 9.17 所示的一个特定实例来加以展示和说明。该实例中所要形成的产品是一个方形横截面的微型金属薄壁导管，我们首先在衬底表面淀积一层厚的光刻胶薄膜材料，如图 9.17(a)所示。常用的对 X 射线比较敏感的光刻胶材料是聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)，在使用 X 射线进行光刻的过程中也要用到掩模，由于大多数掩模材料对 X 射线都是透明的，因此必须在需要阻止 X 射线穿过的区域覆盖一层金薄膜。满足同样要求的薄掩模可以采用厚度介于 1 ~ 1.5 μm 的氮化硅材料。深层 X 射线光刻技术使得曝光区域的光刻胶在随后的显影步骤中被彻底溶解掉[如图 9.17(b)所示]。显影之后留下来的 PMMA 光刻胶就构成了产品的外形轮廓，即上面提到的微型导管的外形轮廓。接下来是在 PMMA 光刻胶上电镀一层所需要的金属层，通常是镍金属层，以制成所需壁厚的金属导管[如图 9.17(c)所示]。最后用氧等离子体或某种化学溶剂将光刻胶(此处即 PMMA)去除之后，就获得了所需要的金属导管产品。

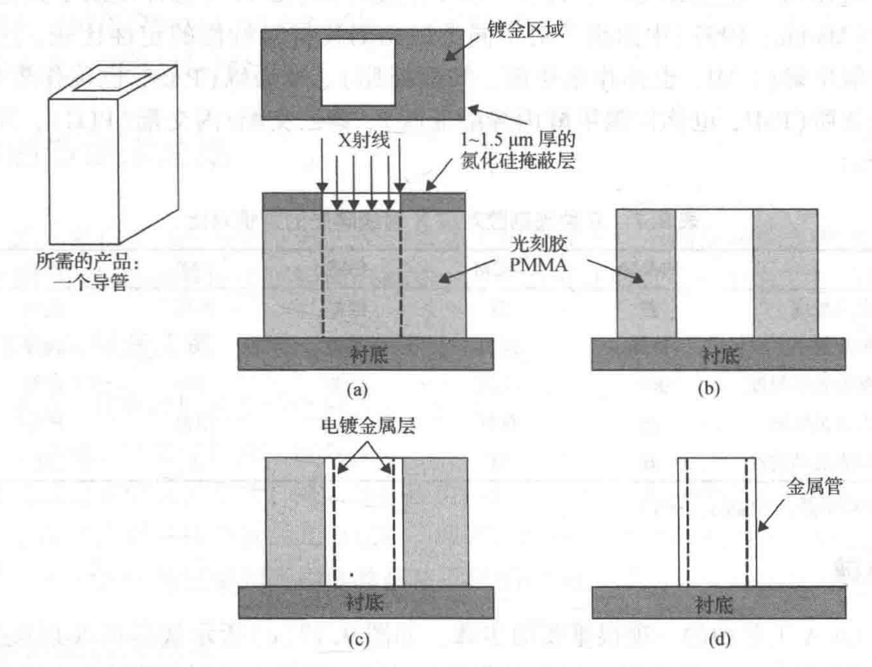


图 9.17　LIGA 工艺的主要步骤：(a)X 射线光刻；(b)曝光后的光刻胶显影；(c)电镀之后；(d)去胶之后

对于大多数的应用而言，所要求的产品通常是可以随后进行注塑形成微型塑料产品的金属模具，如图 9.16 中的框图所示。

9.4.2 用作衬底和光刻胶的材料

LIGA工艺中的衬底材料：LIGA工艺中使用的衬底通常称为基板，它必须是一个导体材料，或者是一个涂有导电材料的绝缘体。衬底之所以必须能够导电，是因为要便于能够进行电镀，这是LIGA工艺的一个组成部分。适合用来做衬底的材料包括：奥氏体钢，上表面镀有一薄层钛或Ag/Cr的硅晶圆片，镀有金、钛或镍的铜板。除此之外，镀有薄层金属的玻璃板也可以用作衬底。

光刻胶材料：LIGA工艺对光刻胶材料的基本要求可以概括如下：

- 必须对X射线辐射敏感；
- 必须具有较高的分辨率，同时还必须对干法刻蚀和湿法腐蚀具有较强的抗腐蚀性；
- 在140℃以上具有较好的热稳定性；
- 未曝光的光刻胶在显影过程中完全不会被溶解掉；
- 在电镀过程中必须与衬底保持非常好的粘附性。

基于上述这些要求，PMMA被认为是目前用于LIGA工艺的最佳光刻胶材料。但PMMA的光刻灵敏度较低，这就使得光刻过程非常缓慢。根据[Madou，1997]的报道，利用德国波恩功耗为2MW的ELSA同步加速器加速到2.3 GeV所产生的波长为5Å的射线对厚度为500 μm的PMMA光刻胶进行曝光，所用的曝光时间超过90 min。采用PMMA的另一个缺点是其在应力作用下非常容易产生裂纹。由于上述原因，已经考虑并使用了其他的光刻胶材料。文献[Madou，1997]中给出了对不同类型光刻胶材料特性的定性比较，这些光刻胶材料包括聚氧甲烯(POM，也称作聚甲醛、缩醛树脂)、聚烯砜(PAS，也称作聚烷基)、聚甲基丙烯酰亚胺(PMI，也称作聚甲醛丙烯酸亚胺)、聚乙交酯/丙交酯(PLG)，其特性比较如表9.7所示。

表9.7 几种光刻胶对深X射线曝光的特性对比

	PMMA	POM	PAS	PMI	PLG
感光灵敏度	差	好	极好	尚可	尚可
图形分辨率	极好	尚可	很差	好	极好
侧壁的光滑程度	极好	很差	很差	好	极好
应力腐蚀影响	差	极好	好	很差	极好
对衬底的粘附性	好	好	好	差	好

资料来源：[Madou，1997]。

9.4.3 电镀

电镀是LIGA工艺中的一项很重要的步骤。如图9.17(c)所示就是在X射线光刻之后，在光刻胶形成的腔体内表面电镀一层金属薄膜的过程。镍是在光刻胶侧壁上电镀的常用金属材料。其他可以用来电镀的金属或金属合金材料包括Cu、Au、NiFe和NiW等。导电衬底及涂有光刻胶的微结构就构成了电镀工艺中的阴极，如图9.18所示。

电镀的工作原理是氯化镍溶液($NiC\ell_2$)中的镍离子Ni^{2+}与阴极上提供的电子发生反应形成镍，其化学反应过程如下：

$$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$$

然而我们还应该注意到，阴极表面也会有 H_2 出现，这可能会导致镀上的镍层不均匀。H_2 是由溶液电解出的 H^+ 离子产生的。在阴极上 H^+ 生成 H_2 的化学反应如下：

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

为了避免电镀层质量受到氢气泡的影响，我们必须严格控制电镀液的 pH 值、温度以及电解的电流密度。

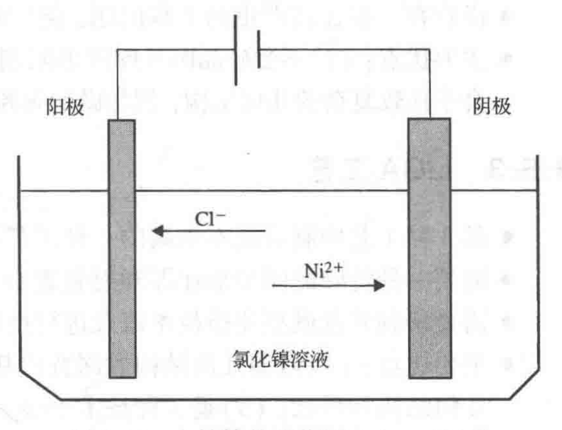


图 9.18　电镀镍的工艺[Schulze, 1998]

9.4.4　SLIGA 工艺

我们从图 9.16 和图 9.17 可以看到，最后制成的产品，不管是一个微结构，还是一个金属模具，它们都是和衬底或基板附着在一起的。对于电镀工艺来说，粘附到导电衬底上是非常必要的。但是从 LIGA 工艺本身来看这种与衬底基板的粘附却是多余的。我们以图 9.17 所示的采用 LIGA 工艺中制作的方形中空金属导管为例，该方形导管在内壁电镀上金属薄膜之后就无法与衬底基板分离。目前人们又开发了一种称为牺牲层光刻电铸成型(SLIGA)的工艺技术，这种改进型的工艺技术可以解决上面的问题。SLIGA 工艺的原理是在 PMMA 光刻胶与衬底之间插入一个牺牲层，这样就可以在电镀完成之后实现金属模具与衬底的分离。这个分离过程通常是采用腐蚀牺牲层来实现的。为了达到这个目的，一般采用覆盖一层金属薄膜的聚酰亚胺来作为牺牲层的材料。

9.5　微制造技术总结

本章介绍了目前正在应用的 3 种主要的微加工制造技术。下面是对这 3 种微加工制造技术的一个总结，以便能够有助于工程师们对某个特定的设计项目进行制造工艺的优化选择。

9.5.1　体硅微制造工艺

- 简单直观，具有成熟的文档化制造工艺流程；
- 生产成本低，但是材料消耗较多；
- 适合比较简单的几何形状，例如微型压力传感器芯片以及一些致动元件；
- 仅限于深宽比要求比较低的几何结构，即表面的横向尺寸要远大于深度尺寸，这是因为微结构的整体高度受到所用硅晶圆片厚度的限制。

9.5.2　表面微加工技术

- 需要在衬底上构建不同的材料层；
- 具有比较复杂的掩模设计及生产过程；
- 必须腐蚀牺牲层；
- 整个工艺过程比较冗长，制造成本高；

- 尚存在一些比较严重的工程问题，例如界面应力和层间粘连等；
- 主要优点：(1)不受硅晶圆片厚度的限制；(2)可以选用的薄膜材料范围比较宽；(3)适合于比较复杂的几何结构，例如微型阀和致动器。

9.5.3 LIGA工艺

- 是3种工艺中制造成本最高的一种工艺；
- 需要一种特殊的同步加速器辐射装置来完成深X射线光刻；
- 需要研制开发微型注模技术以及进行批量化大生产的设备；
- 主要优点：(1)微型几何结构的深宽比基本上不受限制；(2)易于实现灵活多样的微型几何结构和形状；(3)是3种技术中唯一可以制备金属微结构的工艺；(4)在具有注模设备的情况下，是3种制造工艺中最适合批量化大生产的一种工艺技术。

本章习题

第一部分：多项选择

1. "微加工"和"微制造"之间的关系是________。
   (1)同义的；(2)反义的；(3)没有关系
2. 一般说来，目前有________不同的微制造技术。
   (1)两种；(2)三种；(3)四种
3. 体硅微制造主要涉及从衬底上________部分材料。
   (1)增加；(2)减除；(3)既有增加也有减除
4. 体硅微制造技术中主要采用的微加工工艺是________。
   (1)腐蚀；(2)淀积；(3)扩散
5. 各向同性腐蚀在微制造中几乎是不希望有的，原因是________。
   (1)腐蚀速率太慢；(2)制造成本太高；(3)难以控制腐蚀方向
6. 在使用硅晶圆片的微制造工艺中，最喜欢用的晶向是________。
   (1) <100>；(2) <110>；(3) <111>
7. 在使用硅晶圆片的微制造工艺中，用的最少的晶向是________。
   (1) <100>；(2) <110>；(3) <111>
8. 已经观察到硅的________晶向之间的腐蚀速率比是400:1。
   (1) <100>与<111>；(2) <110>与<111>；(3) <110>与<100>
9. 硅晶体中(111)晶面和(100)晶面之间的夹角为________。
   (1)50.74°；(2)54.74°；(3)57.47°
10. 与各向同性腐蚀速率相比，各向异性腐蚀速率________。
    (1)更快；(2)更慢；(3)差不多相同
11. KOH腐蚀液对SiO_2的腐蚀速率要比对硅的腐蚀速率慢________。
    (1)100倍；(2)1000倍；(3)20 000倍
12. EDP腐蚀液对SiO_2的腐蚀速率要比对硅的腐蚀速率慢________。
    (1)100倍；(2)1000倍；(3)20 000倍
13. 与二氧化硅相比，氮化硅的抗腐蚀性________。
    (1)更强；(2)更弱；(3)差不多相同

14. 一种材料的选择比越高，它作为腐蚀掩蔽保护层的能力就________。
(1)越好；(2)越坏；(3)不好也不坏
15. 与未掺杂硅的抗腐蚀性相比，掺杂硅的抗腐蚀性________。
(1)更强；(2)更弱；(3)几乎相同
16. 硅的过量掺杂会导致________。
(1)残余应力；(2)残余应变；(3)硅衬底中原子键的断裂
17. 湿法腐蚀可以在________的边界处停止。
(1)P-N 掺杂硅；(2)P 硅/硅；(3)N 硅/硅
18. 在微电子工艺中目前有________干法刻蚀技术。
(1)一种；(2)两种；(3)三种
19. 各向同性腐蚀速率要比各向异性腐蚀速率快________。
(1)2 倍；(2)5 倍；(3)10 倍
20. 在为深腐蚀工艺选择掩蔽保护材料时，所选材料应该具有________的选择比。
(1)较高；(2)较低；(3)中等
21. DRIE 代表________。
(1)干法刻蚀；(2)干法反应离子刻蚀；(3)深层反应离子刻蚀
22. DRIE 是________的最好方式。
(1)干法刻蚀；(2)快速刻蚀；(3)深层刻蚀
23. PSG 代表________。
(1)多晶硅玻璃；(2)磷硅酸盐玻璃；(3)磷硅玻璃
24. PSG 是________的常用材料。
(1)有源衬底；(2)无源衬底；(3)牺牲层
25. 表面微加工中的牺牲层是用来________。
(1)增加微结构的强度；(2)在微结构中建立必要的几何空间；(3)作为微结构的一个组成部分
26. 与 SiO_2 相比，PSG 用作牺牲层材料要更为普遍，这是因为它________。
(1)腐蚀速率更快；(2)腐蚀速率更慢；(3)可以用 HF 腐蚀液更便宜地腐蚀
27. 表面微加工中最常用的结构材料是________。
(1)PSG；(2)多晶硅；(3)二氧化硅
28. 在表面微加工技术中，牺牲层的腐蚀速率与其他层的腐蚀速率相比必须________。
(1)慢得多；(2)差不多相同；(3)快得多
29. 粘连现象存在于________中。
(1)体硅微制造工艺；(2)表面微加工技术；(3)LIGA 工艺
30. 在利用表面微加工技术制作的微结构中，粘连现象起因于________。
(1)不同的材料层；(2)薄膜；(3)不同层之间的原子作用力
31. MEMS 结构的几何深宽比定义为________之比。
(1)深度尺寸与表面尺寸；(2)表面尺寸与深度尺寸；(3)宽度与长度
32. 采用 LIGA 工艺来制造 MEMS 器件，其所用的材料________。
(1)限于硅；(2)限于陶瓷；(3)几乎没有限制
33. 在 LIGA 工艺中之所以要采用同步加速器产生的 X 射线来进行光刻，是因为________。
(1)它对光刻胶更有效；(2)它是更便宜的光源；(3)它能够深入到光刻胶材料中
34. LIGA 工艺中常用的光刻胶材料是________。
(1)任意的光刻胶材料；(2)正性光刻胶材料；(3)负性光刻胶材料
35. LIGA 工艺的主要优点之一是它能够制造出________。
(1)具有较大深宽比的微结构；(2)低成本的微结构；(3)具有精确尺寸的微结构

36. 在LIGA工艺中采用X射线光刻来形成一个MEMS部件的________。
(1)轮廓；(2)实际几何结构；(3)复制品
37. X射线光刻的光刻胶提供了一个MEMS部件的________。
(1)轮廓；(2)实际几何结构；(3)复制品
38. 在LIGA工艺中之所以必须使用导电基板，是因为需要________。
(1)进行信号转换；(2)进行金属的电镀；(3)对模具进行电加热
39. MEMS注模成型的微型模具是由________形成的。
(1)X射线光刻的光刻胶；(2)电镀到光刻胶轮廓上的金属；(3)工艺中去除基板
40. LIGA工艺中光刻胶的最佳选择是________。
(1)POM；(2)PMI；(3)PMMA
41. 对X辐射最敏感的光刻胶是________。
(1)POM；(2)PAS；(3)PMMA
42. 在具备了________的条件下，SLIGA工艺是对LIGA工艺的一个改进。
(1)从产品上切掉基板；(2)一层牺牲层来分离基板和产品；(3)一个洁净的产品
43. 成本最低的微制造技术是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
44. 最灵活多变的微制造技术是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
45. 成本最高的微制造技术是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺

第二部分：简答题

使用不超过20个字①来简要回答下列问题：

1. 利用体硅微制造技术来制作微结构时，对微结构的高度(或深度)有什么限制？
2. 在腐蚀工艺中选择使用的掩蔽保护层材料时，你的主要选择标准是什么？例如要腐蚀中等深度的硅衬底，或者是要腐蚀更深的情形。
3. 描述一下DRIE工艺。DRIE工艺如何能够获得近乎完美的垂直腐蚀？
4. DRIE工艺的主要优点是什么？在微结构中为什么有必要获得近乎完美的垂直侧壁？
5. 体硅微制造和表面微加工的主要区别是什么？
6. 指出表面微加工技术的一个优点和一个缺点。
7. 描述牺牲层在表面微加工技术中所起的作用。
8. 描述粘连现象并指出避免它的可能方法。
9. 列出LIGA工艺的主要优点和主要缺点。
10. 在LIGA工艺中为什么电镀是必要的？

第三部分：微制造工艺设计

1. 按照本章中图9.17所给出的实例，设计一个采用硅材料或塑料来制造厚齿轮的微制造工艺，该齿轮的根部直径为500 μm，齿节直径为750 μm，齿轮的厚度为1000 μm。(a)使用体硅微制造技术；(b)使用LIGA工艺。总结一下从这个练习中你学到了什么东西并可得出什么样的结论。
2. 按照图9.12所给出的实例，设计一个表面微加工工艺流程，用于制作如图2.27所示的梳状驱动的执行器。

---

① 指英文单词。——编者注

第10章　微系统设计

10.1　引言

我们在第2章中介绍了许多MEMS器件的工作原理。不同类型MEMS部件的设计则在第4章、第5章、第6章以及第7章中进行了举例说明，而制造这些部件的多种方法则在第8章和第9章中进行了描述。然而我们还是需要通过可靠的机械电子工程设计来确定各部件最佳的形状和尺寸，以便使其能够组装到微系统中。在上述优化设计的过程中，这些产品结构的完整性和可靠性是主要的考虑因素，但是整个系统的可制造性也是一个关键问题。

微系统产品与其他产品在工程设计上的主要区别在于：微系统的设计需要集成相关的制造和加工工艺。传统产品和系统的机械工程设计很少需要考虑制造工艺的详细工序情况，例如一个机械系统中的齿轮、轴承、紧固件等元件都可以从供应商那里买到，我们并不需要知道这些元件都是如何制造出来的。但是在微系统中，由于涉及到各种MEMS器件，此时情况就截然不同了。各种MEMS元件都是采用多种不同的物理和化学手段制造出来的，如第8章和第9章所述。这些加工和制造工艺经常会涉及到对用于MEMS部件的各种精密材料进行高温和苛刻的物理及化学处理，而这些工艺都会对微系统的性能带来非常严重的影响，因此必须在设计的同时给予关注。已经加工好的部件的公差和微制造工艺本身引起的残余应力和应变等内在因素只是其给微系统性能带来影响的两个明显的例证。

一般说来，微系统的设计包含3个相互关联的主要任务：(1)工艺流程设计；(2)机电系统和几何结构设计；(3)包括组装、封装和测试在内的设计验证。微系统设计中材料的选择也要比传统产品的材料选择复杂得多。在微系统的材料选择上，不仅要考虑用于系统基本结构的材料，而且还要考虑工艺流程中的材料，例如要选择合适的腐蚀液和淀积的薄膜材料等。

上面介绍的微系统设计的复杂性是造成其设计周期长的一个主要原因，这也是导致MEMS和微系统产品长期以来未能被市场广泛接受的主要障碍。在这种多学科的实践领域具有丰富知识和经验的工程师目前也非常少。在本章的后半部分，我们将介绍一种专门为MEMS和微系统产品开发的计算机辅助设计(CAD)工具，目前看来采用计算机辅助设计似乎是解决上述这些问题的一个可行的办法。

10.2　设计考虑

在开始介绍特定的设计考虑之前，我们首先要对涉及微系统设计的各个必要的组成部分进行一个概述，如图10.1所示。从该图中可以看到，一旦产品的性能指标被正确地定义之后，就必须要考虑下列问题：

1. 设计约束；
2. 材料的选择；

3. 制造工艺的选择;
4. 信号映射和转换;
5. 机电系统设计;
6. 产品的封装。

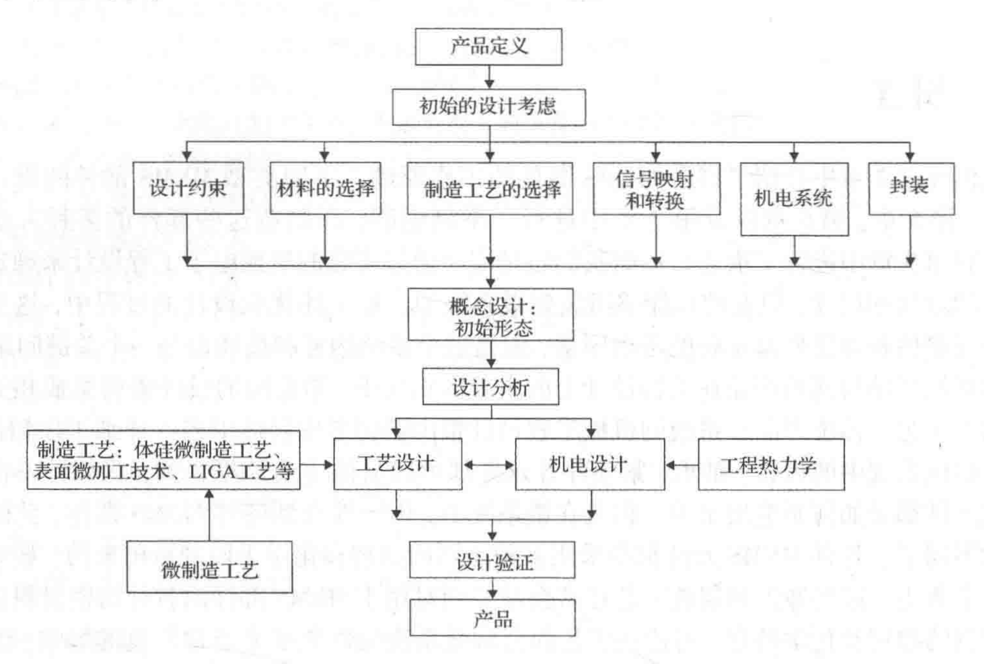


图10.1 微系统工程设计概貌

在考虑了这些问题之后,工程师们就要开始在形状、尺寸、材料以及制造和封装方法等方面进行产品的初始形态设计。然后是进一步对产品的制造工艺和机电系统进行更为详细和深入的设计,以确定初始形态的可行性。产品原型的设计验证通常可以通过计算机模拟的方式来实现,以便确认系统结构的完整性,更重要的是确认微系统所必须具有的各项功能。

10.2.1 设计约束

设计的约束条件可能很多,也可能只有个别几条,这要视具体情况而定。很多约束条件是与产品的市场销售情况相关的,而非技术性的。下面列出的是有关微系统的一些典型的约束条件。

1. **客户需求:** 客户需求同时还必须包括那些未在产品性能规范中特别说明的一些特殊需求,可能是微器件用于一些特殊场合必须具有的某些特殊要求。设想一个这样的微器件其实并不困难。例如,安装在儿童玩具中的传感器或致动器在安全性和耐用性方面,就要与安装在为办公室或实验室工作的成年人准备的产品中的同样器件具有截然不同的考虑。
2. **产品进入市场时间(TTM):** 这个因素也很关键,因为大多数高技术产品都有一个所谓的"市场窗口",随着技术的不断进步,这种窗口也会变得越来越窄。这些特定产品市场窗口的不断变窄也是其市场竞争不断加剧的结果。一个微系统产品必须选准一个关

键的时间点进入市场，这样才能占领市场并获得最大的收益。通常产品进入市场的时间限定了设计工程师设计和推出产品的时间。从我们在10.2节开始部分提到的十分复杂的微系统设计流程来看，只有应用专门面向微系统的计算机辅助设计程序包才是解决进入产品市场时间问题的可行办法。我们将在10.8节中阐述计算机辅助设计(CAD)软件在MEMS设计中的应用。

3. **环境条件**：主要涉及3个方面的关键条件：热学、力学(机械)和化学。一个工作在高温环境下的器件需要特别关注其所受的热应力和应变、材料特性的退化以及信号转换特性的劣化。和一个用来监测汽车轮胎压力的微型压力传感器相比，监测内燃机汽缸压力的微型压力传感器显然需要更加复杂的设计分析和更为严格的材料选择。力学环境关系到支撑微系统的力学(机械)稳定性。一个不断振动的支撑结构可能会导致系统中连接处的松动或者各种电气线路的中断。最后一点，化学工作介质可能会导致MEMS器件及其封装材料的退化。流体介质中的化学成分和潮湿水汽都会导致与其接触的元件出现不希望发生的氧化和腐蚀现象，潮湿的水汽还是引起光电子网络系统中微开关粘连现象的主要原因。如果没有正确的系统设计和制造，微流体系统中各种微型阀和微型泵的微导管就可能会发生阻塞。
4. **物理尺寸和重量限制**：这些约束条件通常包括在产品的性能指标参数中，它们会影响微系统产品的整体形态，并且还会给某些关键设计参数带来一些强制性的限制。
5. **应用**：了解微系统产品是一次性使用还是重复使用的产品是非常重要的。如果是后者，那么就必须要设计产品的预期寿命，同时还要考虑各种元件特性蠕变和疲劳失效的可能性。
6. **制造设备**：这关系到微系统产品制造方法的选择。为了同时满足产品的进入市场时间和生产成本，制造设备对于特定产品的可用性是一个关键因素。
7. **成本**：这个因素能够决定整个产品的设计方向。在当前的市场竞争环境中，成本是决定产品适销性的关键因素。在产品设计的初期阶段，工程师们应该认真地进行产品的成本分析。成本分析将被转换成对各种设计参数的约束条件，例如对所用材料和工艺制造方法的选择等。

10.2.2 材料的选择

我们在第7章中已经知道有很多材料都可以用在微系统中，下面是对这些材料特性的一个概括总结，设计工程师们在为微系统中的不同部分选择合适材料的时候可能会用到这个总结。因为工艺流程是整个设计过程中的一个组成部分，其中需要对腐蚀液以及淀积的薄膜等材料进行仔细的评估，以便在设计中选择合适的材料。

主要的衬底材料 目前主要有两种类型的衬底材料：(1)仅用于支撑作用的无源衬底材料，包括聚合物、塑料、陶瓷等；(2)有源衬底材料，例如硅、砷化镓以及石英等，它们可以在微系统中构成传感或致动元件。

硅材料(Si)：

- 机械性能稳定，成本低廉，易于加工；
- 是制造微型传感器和加速度计极好的候选材料。

砷化镓材料(GaAs):

- 即使在高温条件下，对外部作用(例如光子的照射)的响应也比较快;
- 可以用作热隔离的材料;
- 其优良的压电特性使得它比较适合应用于精密的微致动器中;
- 适合于表面微加工技术;
- 是光学快门、斩波器和致动器的优良备选材料;
- 同时也是微器件和微电路所需要的材料;
- 其缺点是价格比硅等其他衬底材料要昂贵得多。

石英:

- 即使在高温下，也比硅以及硅化物有更好的机械稳定性;
- 热膨胀系数极小，因此是一种理想的高温应用材料;
- 具备精密微致动器所需要的出色的谐振能力;
- 其缺点是难以加工成所需要的形状。

聚合物:

- 主要用作无源衬底材料;
- 某些特殊的聚合物(例如SU-8)可以用来制造具有较大深宽比的永久性微结构;
- 材料和生产工艺的成本都比较低;
- 易于加工成所需要的形状;
- 具有与其他材料混合的柔性，可以满足某些特殊需求;
- 对温度和湿度等环境因素比较敏感;
- 容易受到化学品的侵蚀;
- 大多数聚合物都容易老化，即其特性会随着时间的推移而不断退化。

其他的硅基或硅化物衬底

二氧化硅(SiO_2):

- 很容易在硅衬底表面生长出来或淀积在衬底表面，如第8章中所述;
- 有优异的热隔离和电绝缘特性;
- 可以作为硅衬底湿法腐蚀时很好的掩蔽保护材料。

碳化硅(SiC):

- 即使在高温条件下，其尺寸和化学性质也非常稳定;
- 干法刻蚀时使用铝作为掩蔽层，很容易实现图形化;
- 是深层腐蚀时很出色的钝化保护材料。

氮化硅(Si_3N_4):

- 在扩散工艺中能很好地阻挡水汽和钠离子;
- 在深层腐蚀和离子注入时是很好的掩蔽保护材料;
- 是制作光波导极好的材料;
- 是一种在高温条件下用作高强度电绝缘的很好的保护材料。

多晶硅:

- 广泛用于电阻、晶体管栅电极以及薄膜晶体管中;

- 是一种能够控制衬底电性能的好材料；
- 在太阳能光伏电池中，掺杂多晶硅可以构成很好的电极。

封装材料

- 陶瓷(氧化铝，碳化硅)；
- 玻璃(耐热玻璃，石英)；
- 粘结剂(共晶焊接合金、环氧树脂、硅橡胶)；
- 键合引线(金、银、铝、铜、钨)；
- 插接头和管壳(塑料、铝、不锈钢)；
- 芯片保护填料(硅酮凝胶、硅油)。

10.2.3　制造工艺的选取

在第 9 章中，我们介绍了 3 种可以用来生产微器件和微系统的主要制造工艺。下面是关于这些制造工艺及其优点和缺点的概括总结。

体硅微制造工艺

- 工艺操作中相对比较简单明了，具有文档齐全的制造工艺流程，主要工艺步骤是腐蚀工艺；
- 在 3 种制造技术中是成本最低的一种；
- 适合简单的几何结构和形状，例如微型压力传感器芯片；
- 主要缺点是其深宽比低(在 MEMS 产业中，深度方向的尺寸和平面方向的尺寸的比值定义为深宽比。在体硅微制造工艺中，标准硅晶圆片的厚度限制了微结构的高度)。
- 工艺中涉及到衬底材料的去除，这将导致材料消耗量较大。

表面微加工技术

- 需要在衬底表面形成一些结构层材料；
- 需要为微加工过程中的淀积和腐蚀工艺设计、制造复杂的掩模；
- 在结构层形成之后，对牺牲层的腐蚀是必需的，这会带来一定的浪费；
- 比体硅微制造技术的成本高，因为其工艺流程复杂；
- 主要优点包括：(1)相对于体硅微制造工艺而言，不太受硅晶圆片厚度的限制；(2)在建立各种结构层的时候材料选择的自由度比较宽泛；(3)适合比较复杂的几何形状，例如微型阀和微马达等。

LIGA 和 SLIGA 以及其他高深宽比的工艺

- 是最昂贵的微制造工艺；
- LIGA 和 SLIGA 工艺都需要特殊的同步加速器辐射装置来进行深 X 射线光刻。这种设备对于大多数 MEMS 制造厂来说是不具备的；
- 这几种工艺还需要研发各种微注模技术和设备；
- 主要优点是：(1)它们可以在几何结构的深宽比上提供很大的灵活性，利用 LIGA 工艺可以使深宽比达到 200；(2)它们可以在微结构形态和几何形状方面提供最大的灵活性；(3)事实上 LIGA 工艺对微结构的材料没有任何限制，包括各种金属；(4)它们是 3 种制造技术中最适合大批量生产的。

10.2.4 信号转换方式的选择

对于微型传感器和致动器来说，信号转换都是必不可少的，无论是哪一种情况都需要将来自 MEMS 元件的各种生物、化学、光学、热学或机械能(例如运动)以及其他物理、化学特性转换成电信号，或者进行反向转换。图 10.2 展示了这样的信号转换过程，并给出了针对上述两种类型微器件的各种可选的信号转换方法。

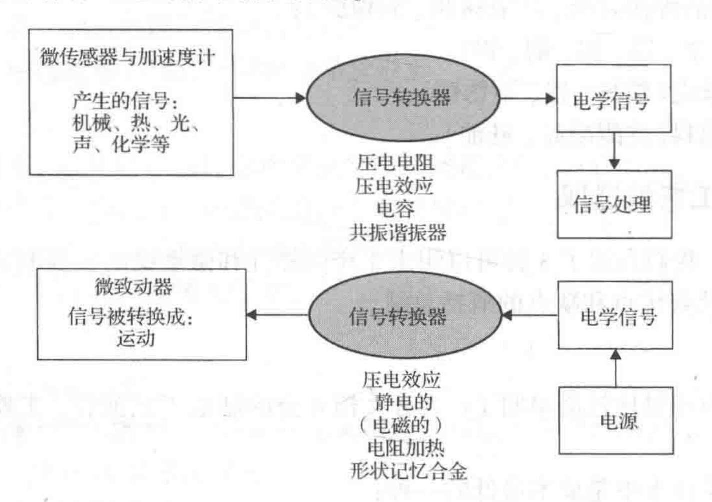


图 10.2 微系统中信号转换器的选择

下面给出一个有关各种信号转换技术的简单介绍，工程师们可以据此来选择最能够满足他们所设计产品要求的特定的信号转换技术。

信号转换系统设计中的另一个关键考虑因素是信号的布局布线设计，包括选择最佳的信号转换器(即传感器)布局位置和最佳的信号传输布线位置的策略。例如，为压力传感器中的信号转换电路选择合适的位置，如图 2.9 和图 7.15 所示。信号转换用的 4 个压敏电阻看起来似乎是在最佳位置上，然而，施压的介质应该出现在压力传感器芯片的上表面处，为此工程师们就会面临如下两个选择：

1. 保持图 2.9 中信号转换器的布局位置不变，但是将压敏电阻、键合引线和金属布线以及金属压焊片保护起来，避免其直接与施压介质相接触。
2. 将信号转换器系统放置在芯片的背面。在这种情况下，需要重新考虑更为复杂的离子注入压敏电阻工艺及其互连引线设计。

从制造工艺的角度来看，上述两种方案都没有太大的吸引力。

下面给出的是关于各种材料和信号转换技术的概括总结，可供工程师们在设计微系统时参考。

1. **压敏电阻**：在微型传感器中硅压敏电阻是最常用到的，因为它尺寸小、信号转换的灵敏度高。压敏电阻也可以在除了硅衬底以外的其他衬底材料上制造，例如可以在砷化镓以及聚合物等材料上制造。我们在 7.6 节中已经介绍了硅压敏电阻的特性。使用压敏电阻的一个主要缺点是必须严格控制掺杂工艺条件以便获得好的质量，另一个更严重的缺点是其电阻率对温度的强烈依赖性(参见表 7.10)。压敏电阻的灵敏度会随着

温度的升高而急剧退化。在高温条件下使用压敏电阻时，必须对信号处理电路进行适当的温度补偿。

2. **压电效应**：正如7.9 节中所述，压电材料都是由晶体构成的。表7.14 中列出了常用的压电晶体材料，工程师们可以据此来为特定的应用选取合适的晶体材料。例如，PZT（$PbTi_{1-x}Zr_xO_3$）晶体材料主要用在位移传感器和加速度计上，而钛酸钡（$BaTiO_3$）晶体则通常用于转换来自微加速度计的信号。另外，石英晶体则在超声换能器中用作振荡器。

   大多数压电材料都是脆性的，因此在封装这种材料时必须给予特别的考虑，以避免其发生脆裂。尺寸与可加工性是使用压电材料时经常遇到的两个问题。压电材料适合在加速度计中用来测量短时间内的动态响应或冲击力，因为长时间持续的压电作用将导致晶体材料过热，从而使其信号转换能力退化。PZT 晶体是在工业中应用最多的压电晶体，因为它们具有较高的压电转换系数，参见表7.14。

3. **电容**：我们在第 2 章中已经学习了电容式信号转换和静电致动的工作原理。尽管这种方法对于高温应用非常有吸引力，但是其电极间缝隙的变化与输出电压之间的变化关系如式(2.3)所述，是一种非线性的输入/输出关系，因此在判读输出信号的时候还需要进行特别的误差补偿。这种方法在微系统中还会占用比较大的空间，因为平行板电容器的输出电容值与平行板电极交叠部分的面积成正比，如式(2.2)所示。

4. **谐振器**：使用谐振器作为信号转换器的工作原理在2.2.5 节中已经介绍过了。尽管这种技术在微型压力传感器的信号转换中能提供更高的分辨率和精度，但是它的制造技术比较复杂，例如在微型压力传感器中就必须要设法将硅梁键合到衬底上，这就大大限制了它在其他微器件上的应用。振动部件所需占用的空间是这种信号转换方法的另一个缺点。

5. **电阻加热**：这一技术在微致动领域获得了广泛的应用，例如在微流体系统中的微型阀和微型泵以及微型热管（参见2.6 节）中都有应用。这种技术比较简单和直接，然而这一技术需要对具有一定热惯性的致动元件的加热过程进行精确控制，这就可能会影响所需要的致动方式的时间响应速度。另外，加热元件与工作介质的接触会引起局部的热传导，这会改变微型阀中工作介质的流动模式。因此这一技术在基于液体的微流体系统中具有严重的缺陷，因为对热传输流体的密封经常会给这类微系统的封装和运行带来一些问题。

6. **形状记忆合金**：当与电阻加热结合在一起使用时，形状记忆合金（SMA）是一种很好的致动材料。它的主要缺点是能够使用的形状记忆合金非常有限，而且形状记忆合金对温度的敏感性使得其形变量经常无法得到精确的预测。

10.2.5　机电系统

在不提供电源的情况下，任何微系统都无法正常工作。对于致动器来说，提供电流或维持电压的电路也是整个系统的一个组成部分。在微型传感器中，需要将信号转换器产生的电信号从器件中引出，并使用适当的电子系统对其进行必要的调节和处理。无论为目标产品选定什么样的电子系统，都需要对机械作用和电子系统之间的接口进行初步的评估，以便使产品进一步具体化。例如在微型压力传感器的设计中，压敏电阻及其互连引线的电

路版图都需要淀积在硅芯片的表面，如图2.9所示，这些版图的设计结果就可能会影响整个芯片的结构。

10.2.6 封装

正如本书前面所提到的，如果采用简单的塑料封装形式，微型压力传感器的封装成本可以低到仅占整个产品成本的20%，但是如果针对某些特殊应用的需求而采用复杂的钝化保护技术以及不锈钢或钨外壳来进行封装，则封装成本有可能占到总成本的95%。因此在器件设计过程的早期阶段，就必须充分考虑那些可能会对器件封装带来影响的设计参数。一般说来，设计工程师必须考虑下列可能会影响产品封装的主要因素：

- 芯片的钝化；
- 介质的保护；
- 系统的保护；
- 电学互连；
- 电路接口；
- 机电隔离；
- 信号调节与处理；
- 机械连接(阳极键合、共晶键合、钨极惰性气体保护电弧焊、粘接等)；
- 用于实现隧道效应与薄膜剥离的工艺；
- 系统装配策略与步骤；
- 产品可靠性与性能测试。

有关以上这些条目以及其他组装、封装和测试等方面的设计考虑，我们将在第11章中给出更为详细的介绍。

10.3 工艺设计

一旦设计工程师选定了某个特定的制造技术之后，无论这种技术属于体硅微制造、表面微加工还是LIGA工艺，都必须要开始选择适当的微加工工艺。我们把微制造中所要用到的各种微加工工艺分成3类：(1)光刻；(2)薄膜加工；(3)结构成型。LIGA工艺则还需包括另外两个步骤：电镀和注模。

10.3.1 光刻

在目前的工艺技术水平下，光刻工艺是唯一可以制备出反映微系统三维结构形状的微细图形的可行方法。它也被用来制作所有微制造技术中所用到的光刻掩模板(或光刻掩模板组合)，包括用于体硅微制造中腐蚀工艺、薄膜淀积工艺、表面微加工技术中的腐蚀(例如可参见图9.12)以及LIGA工艺中的微型模具等的光刻掩模板。我们在8.2节中已经详细介绍了光刻工艺的工作原理。在系统设计流程中，必须要完成3项任务：(1)衬底上的图形设计；(2)光刻掩模板的设计；(3)掩模板组合的制造工艺。

我们以图10.3所示的微型压力传感器中用到的硅芯片为例来进行说明。在图示的情形

中，来自媒介的压力被施加到硅芯片的背面一侧，也就是空腔一侧。硅芯片的正面有 4 个扩散到表面下方的压敏电阻，这些电阻的位置和方向如图 10.4 给出的芯片顶视图（即 SiO_2 薄膜掩蔽层）所示。

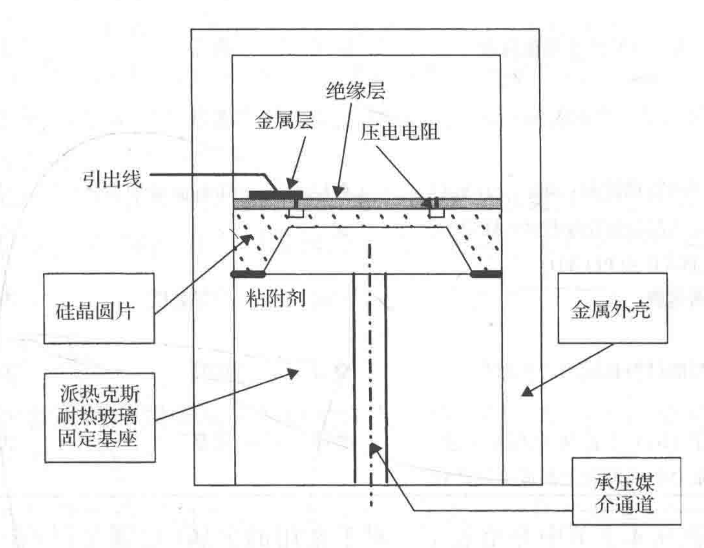
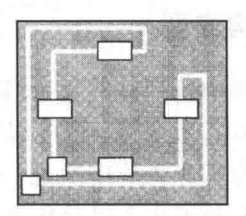


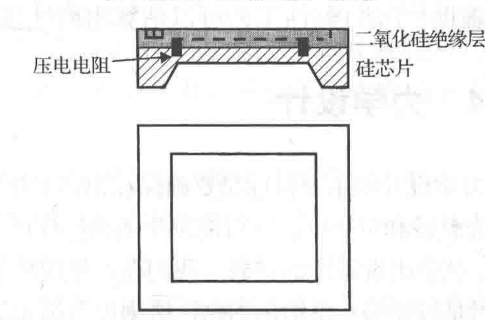
图 10.3　一个微型压力传感器芯片的剖面示意图

我们可以看到该硅芯片需要两个掩蔽层，一个用于腐蚀腔室，另一个用于扩散形成压敏电阻和淀积连接这 4 个电阻的金属导线薄膜。我们在第 8 章中已经学过，二氧化硅和氮化硅都可以满足这一要求。然而由于在硅芯片上加工出大量的腔室需要进行深层腐蚀，因此氮化硅薄膜是一种更合适的掩蔽层材料。

如图 10.4 所示，两个掩模的图形是截然不同的。腐蚀腔室的图形只是一个方形的窗口，而压敏电阻扩散掺杂以及互连引线的图形则要复杂得多。二氧化硅掩蔽层上白线所示的图形是用于连接惠斯通电桥中各个电阻的金属连线，如第 2 章中所述。上面那个掩模板左下角的两个方形压焊块是用来将压力传感器与外部的信号调节和处理单元连接起来的。



用于绝缘层（二氧化硅）的掩模



用于硅腔室的掩模

图 10.4　一个微型压力传感器芯片的掩模板图形

10.3.2　薄膜加工

正如我们在第 8 章中所述，有好几种方法可以在衬底表面形成薄膜。设计工程师可以参考表 10.1 为微系统中薄膜的制备选择特定的工艺。这些工艺有很多都需要高温环境，这就很有可能导致残余应力和残余应变，如 9.3.3 节所述，因此必须尽一切努力来降低这些残余应力的影响。

表10.1　用于微系统的薄膜制备工艺总结

工艺	主要应用	叠层或嵌入	高温或低温	近似生产速率
离子注入(8.3节)	用于形成PN结或其他掺杂	嵌入	低温	式(8.1)
扩散(8.4节)	用于形成PN结或其他掺杂	嵌入	高温	式(8.4)
氧化(8.5节)	使用O_2或水汽形成SiO_2层	嵌入	高温	式(8.9)和式(8.10)
淀积(8.6节)	金属的物理淀积；SiO_2、Si_3N_4以及多晶硅的化学淀积(APCVD、LPCVD和PECVD)	叠层	中等温度至高温	对于APCVD工艺，式(8.23)
溅射(8.7节)	金属薄膜	叠层	中等温度	参考[Madou, 1997]
外延淀积(8.8节)	与衬底材料相同的薄膜材料	叠层	高温	参阅表8.9
电镀	用于LIGA工艺和SLIGA工艺，在聚合物光刻胶上形成金属薄膜	叠层	低温	式(10.1)

电镀工艺已经在9.4.3节中介绍过了。对于常用的金属(也就是镍)在光刻胶材料上的沉积速率，在成品率为100%的情况下可以采用下面的表达式来近似估算[Madou, 1997]：

$$m = \frac{1}{z} iAt \frac{1}{F} M \tag{10.1}$$

式中，A是电极面积；t是电镀时间；F是法拉第常数(即96 487Å/s · mol)；i是电流密度；z是化学反应$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$中涉及到的电子数；$M$是Ni原子的重量。

10.3.3　结构成型

硅基微器件中各部件的复杂结构既可以利用10.3.2节中所介绍的在衬底上淀积各种不同薄膜材料的方式来获得，也可以通过从衬底上去除部分材料的方式来实现。

正如8.9节和9.2节中所述，从衬底上去除某些材料的一个有效方法就是采用腐蚀工艺。利用表9.1和表9.2以及9.2.3节中介绍的化学(湿法)腐蚀工艺和9.2.5节中介绍的等离子辅助(干法)刻蚀工艺可以估算出腐蚀速率。

10.4　力学设计

力学设计的主要目标是要确保在正常工作以及过载的条件下，微系统受到特定载荷作用时的结构完整性和可靠性。在可能发生的误操作以及由于系统误动作导致的不可预计的负载波动等情况下，就会出现系统的过载。我们在这里使用了为宏观和介观尺度的机器和结构而开发的设计方法，但是按照第6章给出的缩比法则以及第4章和第5章中介绍的机械工程设计原理对其进行了必要的调整。正如我们在第12章中将要介绍的，有很多材料的特性是与其尺寸大小密切相关的，因此对于各种亚微米尺寸的元件来说，这些设计原理可能都需要做出一些重要的修正。

10.4.1　MEMS元件的几何结构

尽管目前已经开发出了各种不同类型的微器件并已经将它们推向市场，如第2章中所

述，但是如果我们仔细审视一下这些器件就会发现它们中的大多数部件都呈现出很有限的几种几何结构：(1)用于微致动器的悬臂梁结构(如图 2.19 所示)，用于微型钳的夹臂结构(如图 1.4 所示)，以及用于微加速度计中的梁式弹簧结构(如图 1.6、图 2.34 和图 2.35 所示)；(2)用于压力传感器的平板膜片(如图 1.22、图 2.9、图 2.12 和图 2.14 所示)，用于微加速度计中的平板弹簧(如图 2.37 所示)，以及用于微型阀和微型泵中的薄膜片(如图 2.42 和图 2.43 所示)；(3)用于电液动力泵中的导管(如图 2.4 所示)；(4)用于微流体系统中的各种封闭的或开口的管道(如图 2.40 所示)。

然而 MEMS 和微系统中各种部件的复杂之处在于大多数这类部件都是由多层材料组成的，举例来说，各种梁式结构、导管以及微型管道都覆盖了多层不同的材料，这也大大增加了设计分析的难度。

10.4.2　热力学负载

一个微型传感器或致动器所承受的负载在大多数情况下是与宏观结构完全相同的，它们可以归纳为如下几种类型：

1. 集中力，例如图 2.41 ~ 图 2.43 以及例题 4.7 中微型阀的致动部件与流体通道之间的接触力。
2. 分布力，例如图 2.8 以及例题 4.4 中微型压力传感器薄膜上的压力负载。
3. 动态力或惯性力，例如图 2.35 ~ 图 2.37 以及例题 4.14 中的微加速度计上受到的作用力。
4. 多层结构中由于各层之间热膨胀系数的失配引起的热应力(可以参见图 2.18 以及例题 4.17 ~ 例题 4.19)。
5. 微系统中各运动部件之间的摩擦力，例如一个旋转微电动机(如图 2.32 所示)、直线电动机(如图 2.31 所示)或微型涡轮机(如图 1.11 所示)的轴承等支撑部件。

下面列出的几种作用力是微系统结构中所独有的，尽管其中的某些作用力可以相当准确地测量出来，但是其他的一些作用力则只能定性地估算出来，因此承受这些作用力的各种结构的数学模型就引起了人们特别的关注。人们也经常使用各种经验公式来估算这些作用力：

1. 致动器中所用到的静电力。在 2.3.4 节以及例题 2.3 和例题 2.4 中有对于这一类作用力的评价。我们必须认识到用来估算静电力的式(2.8)、式(2.10)以及式(2.11)只能给出两个平板电极之间产生的平均作用力，而这些静电力在平板电极表面的分布也不可能是均匀的。
2. 压电效应产生的表面力。当有电压施加到压电晶体上时，就会使得压电晶体发生机械形变，从而产生这种表面力。它们可以用来驱动致动器，如图 2.21 所示，5.6.3 节以及例题 7.5 中介绍的微型泵也是采用这种力来驱动的。

   压电作用力是实现微致动常用的作用力，通常这一类作用力从本质上说是一种瞬态的作用力，因为如果长时间地给产生压电作用力的晶体施加电压来形成持续的压电作用力就会导致材料发热，而这是人们不希望发生的事情。由式(7.10)至式(7.12)所决定的压电作用力代表了产生的峰值作用力，而时间因子，也就是峰值作用力的上升时间，则变成了高精度微致动设计分析中的一个关键参数。
3. 在 9.3.3 节中所描述的紧密相邻两个表面之间的范德华力。范德华力也是静电力的一

种表现形式，只不过是在分子的水平上。因为这种力是由于原子内聚力的改变而形成的，因此我们无法精确地估计出范德华力的大小，在第11章中将介绍一种可以用来估算范德华力大小的经验方法。

10.4.3 热力学应力分析

应力分析是设计分析中的一项主要工作。对于那些需要经受高温制造工艺(参见表10.1)或者可能工作在高温条件下的微系统来说，热分析过程中应该包含必要的应力分析。

对于大多数具有10.4.1节中介绍的几何结构的微部件来说，可以采用4.4.3节中给出的公式来进行微系统的热力学应力分析，而对于涉及到更为复杂的几何结构和负载及边界条件的情形，则也可以采用有限元方法[Hsu，1986]来进行微系统的热力学应力分析。然而微系统的热力学应力分析与宏观系统的热力学应力分析还是截然不同的。在微系统中通常会存在很强的由微制造工艺引起的固有应力，例如4.6节和9.3.3节中提到的残余应力和应变就是其中的一种。在后面的应力分析中必须要计算和考虑这些固有的残余应力[Hsu和Sun，1998]。在厚衬底上的薄膜中可能诱生出的本征应力还有以下几种来源[Madou，1997]：

- 采用杂质对衬底进行掺杂时可能会引起本征应力，因为杂质原子尺寸的改变可能会导致晶格失配；
- 在溅射原子时引起的离子轰击和薄膜采用工作气体进行致密时，都有可能导致原子的撞击；
- 由于工作气体的逸出可能导致薄膜中产生微空隙；
- 气体的滞留；
- 聚合物固化时的收缩；
- 淀积和扩散工艺进行中及完成后，由于原子间距的改变而引起的晶粒边界的变化。

在使用有限元分析方法对MEMS和微系统结构进行热力学应力分析时，一个重要的考虑是必须确保选择的是合适的有限元方程。很多本构定律以及本构方程都是根据宏观的连续物体推导出来的，对于亚微米尺度的结构(即尺寸小于1 μm的结构)来说还需要进行一些实质性的修改。例如，针对宏观固体材料式(5.31)给出的热传导方程在应用到亚微米尺度的同类固体材料时就需要进行重大的修改，这一点我们将在第12章中详细介绍。在亚微米尺度下大部分材料的特性都变得与其尺寸密切相关，这使得大部分商业化的有限元程序都无法应用于MEMS和微系统部件的分析中。

10.4.4 动力学分析

动力学分析是针对与运动相关的微系统来开展的。动力学分析的主要目的是要求出：(1)作用在器件或器件中的部件上的惯性力；(2)在几种振动模式下运动结构所固有的特征频率。

在进行应力分析时，必须考虑各种部件由于加速或减速运动所产生的惯性力。另一方面，还要利用模式分析获得的特征频率来避免第4章中所描述的共振现象。然而在某些微系统的设计中，也可以利用梁或平板的共振现象来增大传感器的输出信号，例如2.2.5节所展示的一种特定类型的压力传感器。

一般说来，过度的振动有可能是结构破坏的主要原因之一，因为这会使得材料发生疲劳。有限元方法目前已经广泛应用于微系统的动力学分析中。

例题10.1 本例题展示了脆性微结构设计过程中错综复杂的机电耦合方式。这种情形并不一定是真实的实际情况，因为不太可能采用一个简单的平行板电容器就能够产生出微夹钳器件中所需要的驱动力。这个例题只是用来全面展示了一个结构的机械特性与其电学性能之间的相互影响。

如图10.5所示，一个微夹钳由一个平行板电容器进行驱动，该平行板电容器的两个正方形极板之间的初始间隙是4 μm，夹钳臂由单晶硅材料制成，夹钳的设计目标是夹持起质量为3 mg的刚性物体。电容器在大气环境中工作，因此该电容器中的相对介电常数是1.0，试解答以下问题：

1. 夹持起上述物体所需外加的电压。假设夹持点和物体表面之间的摩擦系数为1.0；
2. 夹钳臂上的最大应力；
3. 夹钳臂上的最大形变量；
4. 夹钳臂的形变效应对这个微器件性能的影响。

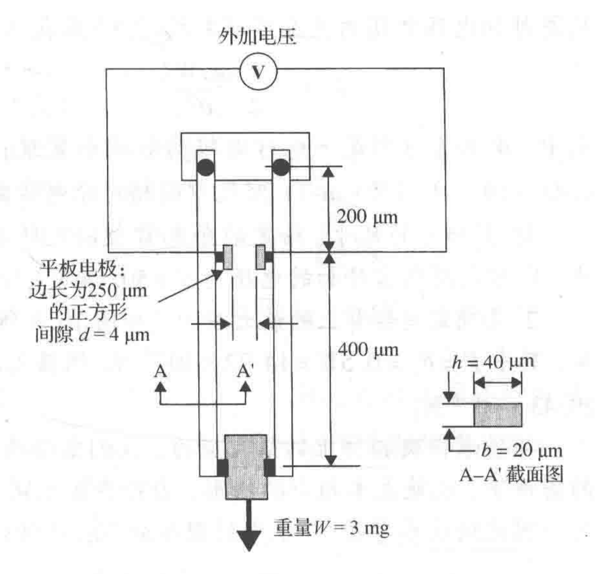


图10.5 一个微夹钳示意图

解答：

1. 为了求出夹持物体所需外加的电压，我们首先需要确定夹持物体所需的静电力。该静电力可以通过作用在夹持臂上各作用力的静态平衡条件来确定。

我们假设每个夹持臂承担同样的重量，即 $W/2 = 1.5$ mg，作用在夹持臂上的力如图10.6给出的自由体受力图所示。

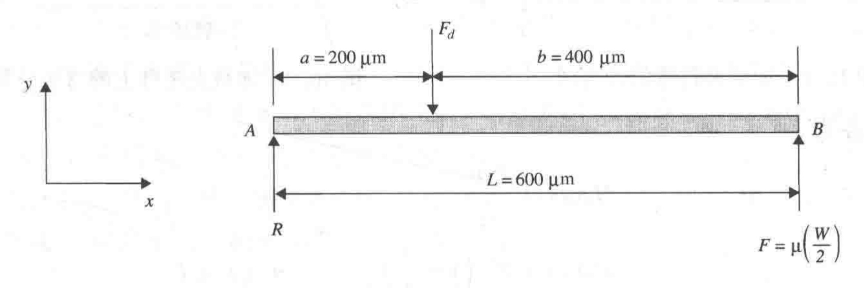


图10.6 夹钳臂自由体受力图

在图10.6中，R 代表铰链支撑处的反作用力；F_d 代表所需的由电容产生的静电力；F 代表所需的夹持力；μ 是摩擦系数（其数值为1.0）；W 代表被夹持的物体重量（即3 mg）。

依据第一个作用力的静态平衡条件，也就是 $\sum F_y = 0$，可以得到：

$$R + F - F_d = 0 \tag{a}$$

再依据另一个关于力矩的静态平衡条件，即 $\sum M_A = 0$，可以得到：

$$200F_d - 600F = 0 \tag{b}$$

根据方程(a)和(b)可以求出 $F_d = 3F = 3(W/2) = 1.5\ W$。

因为被夹钳臂夹取的物体重量为 $W=3\ \mathrm{mg}=29.43\times10^{-6}\ \mathrm{N}$，由此我们根据上式可以计算出所需的静电力为 $F_d=44.15\times10^{-6}\ \mathrm{N}$。我们在2.3.4节中已经了解到当一个平行板电容器的尺寸如图10.7所示时，其所产生的静电力 F_d 与外加电压之间的关系可以由式(2.8)来表示：

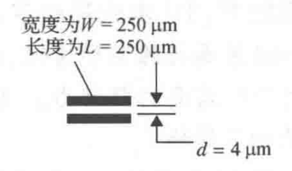


图10.7 两个平行板电极之间的距离

$$F_d=-\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r WL}{d^2}V^2$$

式中，W 和 L 分别是平板行电极的长度和宽度；ε_0 是自由空间的介电常数，其数值为 $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C/(N\cdot m^2)}$；空气中的相对介电常数为 $\varepsilon_r=1.0$。

将 W 和 L 的尺寸、给定的介电常数以及所需要的夹持力 $F_d=44.15\times10^{-6}\ \mathrm{N}$ 代入上式中，即可求得所需外加的电压为 $V=50.54\ \mathrm{V}$。

2. 要确定夹钳臂上的最大应力，如图10.8所示，夹钳臂必须受到弯曲和拉伸力的联合作用，其中 $F=F_w=0.5W=14.72\times10^{-6}\ \mathrm{N}$，根据式(a)我们就可以求得反作用力为 $R=F_d-F=29.43\times10^{-6}\ \mathrm{N}$。

为了求得夹钳臂上的最大应力，我们需要确定梁上受到的最大弯矩。在受到集中作用力的条件下，也就是本题中的情形，力矩在简支梁上的分布可以在很多工程力学的教科书中找到。因此通过参考图10.9中的弯矩分布，可以得到下面的表达式：

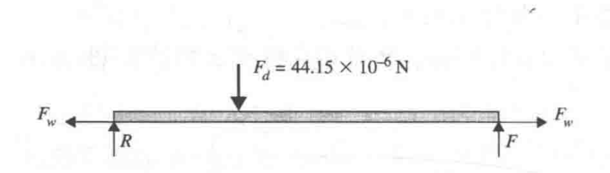


图10.8 加载夹钳臂的受力图

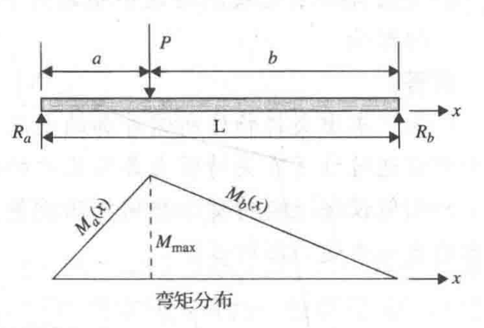


图10.9 加载夹钳臂上的弯矩分布示意图

- 力矩分布：

$$M_a(x)=\frac{Pbx}{L},\qquad 0\leqslant x\leqslant a \tag{c}$$

$$M_b(x)=Pa\left(1-\frac{x}{L}\right),\qquad a\leqslant x\leqslant L \tag{d}$$

梁上的最大弯矩出现在 $x=a$ 处，且最大弯矩为 $M_{\max}=Pba/L$。

- 形变量：

$$\delta_a(x)=-\frac{Pbx}{6EIL}(L^2-b^2-x^2),\qquad 0\leqslant x\leqslant a \tag{e}$$

$$\delta_b(x)=-\frac{Pbx}{6EIL}(L^2-b^2-x^2)-\frac{P(x-a)^3}{6EI},\qquad a\leqslant x\leqslant L \tag{f}$$

夹钳臂的最大形变量出现在：

$$x_m=\sqrt{\frac{L^2-b^2}{3}} \tag{g}$$

在负载P作用下的形变量可以通过下式求得：

$$\delta_p = -\frac{Pba}{6EIL}(L^2 - a^2 - b^2) \tag{h}$$

现在可以利用下面的表达式来计算梁上的最大应力了，其中梁同时受到弯曲和拉伸负载的共同作用：

$$\sigma_{\max} = \sigma_{m,b} + \sigma_t \tag{i}$$

式中，$\sigma_{m,b}$是梁受到的最大弯曲应力，而σ_t是梁受到的拉伸应力。

要确定上述这两个应力，需要先求出梁的截面积A及其面积惯性矩I。梁的截面如图10.10所示，根据图中数据可以计算出其截面积为$A = 8 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$，其面积惯性矩为$I = 1.0666 \times 10^{-19}\ \text{m}^4$，梁受到的最大弯曲应力可由下式求得：

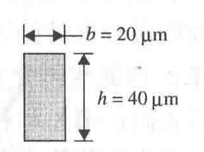


图10.10　夹钳臂的截面示意图

$$\sigma_{m,b} = \frac{M_{\max}C}{I} = \frac{M_{\max}h}{2I}$$

式中，$M_{\max} = Pba/L = F_d ba/L = 5.887 \times 10^{-9}\ \text{N} \cdot \text{m}$，$h = 20 \times 10^{-6}\ \text{m}$，由此可以求得梁受到的最大弯曲应力为$\sigma_{m,b} = 1\ 103\ 800\ \text{N/m}^2$，即1.1038 MPa。而梁受到的拉伸应力则可以表示为$F_w/A = 0.0184 \times 10^6\ \text{N/m}^2 = 0.0184\ \text{MPa}$。因此夹钳臂上的最大应力为：

$$\sigma_{\max} = \sigma_{m,b} + \sigma_t = 1.1038 + 0.0184 = 1.1222\ \text{MPa}$$

可以看到，$\sigma_{\max}$远小于硅的屈服强度(其数值为7000 MPa，如表7.3所示)。

3. 梁的最大形变量：夹钳臂最大形变量发生的位置x_m由式(g)给出，在该例题给定的情况下，其数值为$x_m = 258.2 \times 10^{-6}\ \text{m}$，与之相对应的最大形变量可以通过式(f)计算求得，当采用杨氏模量为$1.9 \times 10^{11}\ \text{N/m}^2$时，计算求得的最大形变量为$\delta_{\max} = 0.00833\ \mu\text{m}$。

4. 正如从图10.5中所看到的，夹钳臂发生形变使得产生静电夹持力的电容器缝隙d变窄，而缝隙的大幅度变窄将使得夹持力F_d急剧增加，这将进一步使臂发生变形。显然这是一个自加速的过程，它有可能导致夹钳毁坏。因此在这个设计实例中，很关键的一点是要估算出形变引起的电容器缝隙变化情况。所以我们必须利用式(h)计算出作用力F_d引起的形变，在本例题中，计算得到的形变量是0.007 746 μm，也就是缝隙d缩小了0.015 μm，或发生了0.375%的变化，这个变化在本例题中是可以忽略的。

为了避免这种夹钳结构的不稳定性，在本设计中必须要采用一个机械的阻塞装置来防止电容器的缝隙由于前面介绍过的机电耦合效应而不断变窄。

10.4.5　界面断裂分析

微系统的各个部件中经常会包括一些其他的外来物质，其中很多也是由各种各样的薄膜材料构成的。这些外来物质有可能是通过扩散或离子注入工艺引入到衬底中的，而各类薄膜材料则是通过不同的淀积技术淀积在衬底表面的。我们在第9章中介绍的3种微制造技术都涉及到多层薄膜。因此在微系统结构中，不同材料之间的界面是很常见的。

由不同材料构成的多层结构会带来严重的力学问题。除了由于热膨胀系数不匹配导致过大的热应力和应变之外，多层结构还很容易发生界面断裂。在微结构的力学设计中，界面的分层是一个主要考虑的问题。

我们在4.5.3节中知道了如何通过计算涉及到界面断裂的开放模式和剪切模式的耦合应

力强度因子来分析两种不同材料之间界面的机械强度。然而目前的一个主要问题是缺少可以使用的相关断裂韧度数值，该数值是确定计算得到的应力强度因子是否低于安全极限的依据，因为该安全极限就是由断裂韧度决定的，如图4.52所示。

10.5 使用有限元方法的力学设计

我们在第4章和第5章中已经展示了连续力学与热传导的理论及原理可以用于许多MEMS和微系统部件的力学设计与分析中。但是在很多情况下我们还是需要一些更全面的分析工具来处理那些包含复杂的几何形状以及复杂的负载与边界条件的微系统及其部件。此外，正如我们在第8章和第9章中所了解到的，很多这样的设计分析中都要求包含各种热力学效应，因为这些热力学效应在各种利用微加工和微制造工艺制成的部件中是普遍存在的。在这样的情况下，有限元分析就成了设计工程师们唯一可用的工具。

4.7节介绍了有限元分析方法的工作原理。接下来我们将要介绍的是这种得到广泛应用的有效方法的基本方程，以及这种方法是如何被用于解决微系统的力学设计问题的。在一些很好的参考书中都有关于有限元方法的详细推导过程，例如在[Zienkiewicz, 1971]、[Segerlind, 1976]、[Bathe 和 Wilson, 1976]、[Hsu, 1986]，以及[Heinrich 和 Pepper, 1999]等书中。

10.5.1 有限元方程

离散化 这一过程开始于将一个如图10.11(a)所示的连续体细分为在节点处相互连接的有限个单元的组合，如图10.11(b)所示。从中可以看到，经过这样的离散化处理之后，初始的弯曲边界就近似成了一些单元沿着边界处的直边。一旦对离散化的模型满意之后，用户就可以将这些单元里的基本未知量与那些相关的节点建立联系。基本未知量是在有限元方程里用作基本物理量的未知量。这些未知量的计算值将产生出分析中所需要的其他未知量的值，例如在应力分析中，基本未知量就是单元的位移分量。利用本构方程可以由单元的位移计算出单元的应变和应力。基本未知量随着实际应用领域的不同而有所不同。例如，如图10.11(a)所示，$\{U(\mathbf{r}, t)\}$代表应力分析中单元的位移分量，单元的温度$T(\mathbf{r}, t)$可以用于热传导分析，而单元的速度分量$\{V(\mathbf{r}, t)\}$则是用于流体动力学分析的。在这些数学符号中，我们用一个位置向量$\mathbf{r}$和时间t来代表空间坐标和时间坐标。然而对于大多数的有限元分析来说，离散化的过程是在空间域中展开的，至于瞬态分析的结果，则是采用各种不同的积分方法将这些变量对时间进行积分来得到的[Hsu, 1986]。因此对于上述3种常见的机械工程分析来说，离散化的数学表达式可以表述成下面的形式：

$$\{U(\mathbf{r})\} = [N(\mathbf{r})]\{u\} \tag{10.2a}$$

对于应力分析来说，上式中的$[N(\mathbf{r})]$是插值函数，$\mathbf{r}$代表定义单元的位置向量，这一位置向量代表空间的坐标位置。例如，在笛卡儿坐标系中就是(x, y, z)，或者在轴对称体的柱坐标系中就是(r, z)。向量$\{u\}$代表相对应的节点位移分量。

同样，如图10.11(c)所示，我们也可以分别把用于热传导和流体动力学分析的离散化过程表示出来，其中用于热传导分析的离散化过程可以表述为：

$$T(\mathbf{r}) = [N(\mathbf{r})]\{T\} \tag{10.2b}$$

式中 T 是相对应的节点温度。而用于流体动力学分析的离散化过程则可以表述为：

$$\{V(\mathbf{r})\} = [N(\mathbf{r})]\{v\} \tag{10.2c}$$

式中 v 是相对应的节点速度分量，如图 10.11(d)所示。

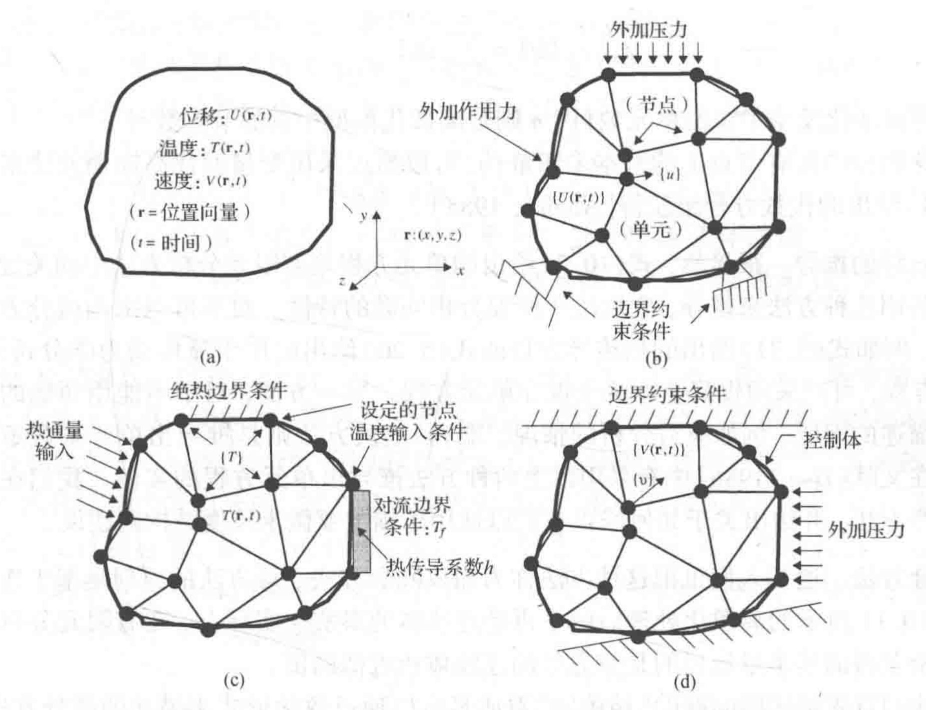


图 10.11 有限元分析中的连续体离散化：(a)连续体；(b)用于应力分析的连续体离散化；(c)用于热传导分析的连续体离散化；(d)用于流体动力学分析的连续体离散化

单元节点上基本未知量的值与施加在节点上的负载之间可以通过下面的单元方程来建立联系：

$$[K_e]\{q\} = \{Q_e\} \tag{10.3}$$

式中，$[K_e]$是单元的系数矩阵；$\{q\}$是节点处的基本未知量；$\{Q_e\}$是节点上施加的负载。

单元的系数矩阵中包含一些与单元形状有关的常数——离散化过程中用到的插值函数以及单元的材料特性参数。在有限元分析中用到的材料特性参数包括应力分析中的弹性常数和泊松比，或者热传导分析中的热导率。

在应力分析中，式(10.3)中施加在节点上的负载就是施加在节点上的作用力或者是单元表面上外加压力的等效节点力[如图 10.11(b)所示]。在热传导分析中，它们也可以是热通量和(或)指定节点的温度[如图 10.11(c)所示]。通过转换成沿着固体/流体边界处对应单元上相邻节点上的等效热力，图 10.11(c)中的对流边界条件可以利用式(5.38)给出的关系式来处理[Hsu, 1986]。在流体动力学分析中，施加的节点负载可以是作用在一个控制体表面的压力[如图 10.11(d)所示]。

在离散化的连续体$\{q\}$中，所有节点处的基本未知量都可以通过下面的总平衡方程来求得：

$$[K]\{q\} = \{Q\} \tag{10.4}$$

式中，离散化模型中的总系数矩阵$[K]$是通过对所有单元的系数矩阵$[K_e]$进行求和而构造出来的，即：

$$[K]=\sum_{1}^{M}[K_e] \tag{10.5a}$$

总负载矩阵$\{Q\}$则可由下式求得：

$$\{Q\}=\sum_{1}^{n}\{Q_e\} \tag{10.5b}$$

式中，M是离散化模型中总的单元数目；n则是离散化模型中总的节点数目。

离散化模型中所有节点上的基本未知量$\{q\}$可以通过采用变量回代高斯消元法来同时求解式(10.4)给出的代数方程组获得[Allaire，1985]。

单元方程的推导 很显然，式(10.3)给出的单元方程是有限元分析方法中的关键。这个方程可以利用几种方法来推导，它取决于所要分析问题的特性。对于可以采用微分方程来描述的问题，例如式(5.31)给出的热传导方程或式(5.20)给出的用于流体动力学分析的Navier-Stokes方程，可以采用伽辽金方法来推导单元方程。另一方面，对于不能用明确的微分方程来进行描述的问题，例如应力分析的情况，瑞利-里茨方法则是推导出单元系数矩阵的可行途径。在文献[Hsu，1986]中有采用以上两种方法推导出单元方程的实例。我们在此将简要概述这些方法，并给出关于如何修正它们以适用于描述亚微米尺度结构的建议。

伽辽金方法 通常人们也把这种方法称为加权残余方法。该方法的原理是基于连续体在经过如图10.11所示的离散化处理后就不再是连续体的事实。实际上，在有限元分析中通过离散化模型获得的基本量给出的是与原始的连续体相近似的值。

因此我们首先把实际问题的"精确解"看成是可以通过数学形式来描述的微分方程的解，并且这些微分方程已经具有适当的边界条件：

$$\text{在空间域 } V \text{ 中，} D(\phi)=0 \tag{10.6a}$$

$$\text{在边界域 } S \text{ 上，} B(\phi)=0 \tag{10.6b}$$

式中，D和B分别是微分方程的微分运算符和边界条件。在微系统设计中，函数ϕ代表图10.11(a)所示的3种常用有限元分析中的基本未知量。

式(10.6a)代表了针对场问题的微分方程，例如式(5.20)中针对流体动力学问题的方程以及式(5.31)中针对固体温度场问题的方程。式(10.6b)中给出的边界条件代表了诸如式(5.36)至式(5.38)针对热传导分析给出的边界条件表达式。

上述系统还可以采用下面的积分方程来代替，其中的变量ϕ是式(10.6)中的基本未知量：

$$\int_v WD(\phi)\,\mathrm{d}v+\int_S \overline{W}B(\phi)\,\mathrm{d}S=0 \tag{10.7}$$

式中，W和$\overline{W}$是任意的权重函数。

式(10.7)给出的是式(10.6a)与式(10.6b)所代表的连续体的"精确解"。依据式(10.2b)和式(10.2c)，通过求解关于离散化连续体的一个类似的方程(其中一般性的表达式为$\phi=\sum N_i\phi_i$，N_i和ϕ_i分别是插值函数和节点处的基本未知量)，可以得出以下形式的解：

$$\int_v W_j D\left(\sum N_i\phi_i\right)\mathrm{d}v+\int_s \overline{W}_j B\left(\sum N_i\phi_i\right)\mathrm{d}S=R \tag{10.8}$$

式中，W_j和$\overline{W}_j$分别是离散化的连续体及其边界条件的权重函数。

我们注意到，把方程式(10.7)中的未知量 ϕ 置换成离散化的数值 $\phi = \sum N_i \phi_i$（其中的 i 是单元中节点元素的总数）之后，将得到方程式(10.8)给出的残余值 R。这一残余值的存在是源于离散化的连续体提供的解的近似特性。从物理意义上说，残余值反映了一个连续体问题的精确解和同样的连续体问题经过离散化之后得到的近似解之间的差别。

当然，一个好的离散化系统要求满足残余值 R 趋近于零的条件。通过选择与插值函数完全相同的权重函数，也就是使得 $W_j = W_j = N_i$，当我们相对于式(10.8)中的变量 ϕ_i 对残余值进行了变分处理之后，就可以得到如式(10.3)所示的单元方程。

对于亚微米尺度的结构，由宏观连续体推导出的微分方程，例如式(5.31)所示的热传导方程，就必须由第 12 章中给出的针对亚微米和纳米尺度连续体的微分方程来取代。同样，式(5.20)给出的 Navier-Stokes 方程也需要由 Boltzmann 方程来取代[Beskok 和 Karniadakis，1999]。

瑞利-里茨方法　这种方法引入了一个泛函变量，用于推导有限元分析中的单元方程。对于伽辽金方法来说，这是个一个可行的替代方法，而且它特别适合用来求解那些无法用明确的微分方程来进行描述的问题，例如固体结构的应力分析。泛函一般定义为函数的函数。

对于固体结构的应力分析，在变量中使用的泛函是形变结构的势能 $P(\{u\})$，其中 $\{u\}$ 表示未知节点的位移分量，如图 10.11(b)所示。在很多关于有限元分析的教材中都有弹性形变固体势能的推导。[Hsu，1986]的教材中给出了有关弹-塑性形变固体势能的论述。下面的关系式可以用来推导这个势能函数：

$$P(\{u\}) = U(\{u\}) - W_k(\{u\}) \tag{10.9}$$

式中，$U(\{u\})$ 是应变能；$W_k(\{u\})$ 是施加的体作用力和表面牵引力对固体所做的功。

对式(10.9)所示的势能函数相对于节点位移 $\{u\}$ 应用变分原理，即可推导出式(10.3)所示的单元方程。由此可以得到下面的表达式：

$$[K_e]\{u\} = \{F\} \tag{10.10}$$

式中，$[K_e]$ 和 $\{F\}$ 分别是单元的刚度矩阵和节点的作用力矩阵。

单元的刚度矩阵可以由下面的积分式求得：

$$[K_e] = \int_v [B(\mathbf{r})]^{\mathrm{T}}[C][B(\mathbf{r})]\,\mathrm{d}v \tag{10.11}$$

而节点的作用力矩阵则可以通过下面的积分式得到：

$$\{F\} = \int_v [N(\mathbf{r})]^{\mathrm{T}}\{f\}\,\mathrm{d}v + \int_s [N(\mathbf{r})]^{\mathrm{T}}\{t\}\,\mathrm{d}s \tag{10.12}$$

式中，v 是单元的体积，s 是单元的表面积，$\{f\}$ 是施加在单元上的体作用力，$\{t\}$ 是作用在单元表面积 s 上的表面牵引力。

式(10.11)中的矩阵 $[B(\mathbf{r})]$ 建立了单元应变分量 $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ 与节点位移 $\{u\}$ 之间的关系。矩阵 $[C]$ 是与材料的弹性模量和泊松比相关的弹性矩阵。对于弹-塑性应力分析来说，可以用增量弹性理论推导出的弹-塑性矩阵 $[C_{ep}]$ 来代替式(10.11)中的 $[C]$ 矩阵[Hsu，1986]。

一旦确定了各个节点处的位移 $\{u\}$，就可以利用式(10.2a)来求得相对应的单元位移，并通过弹性理论和本构关系中合适的方程(例如用于弹性应力分析的广义胡克定律)，来求得单元的应变和应力。

在热流体分析中，亚微米尺度形变结构的有限元分析方法需要进行重大的修改，才能适

应其与几何结构及尺寸相关的各向异性材料性能，同时也才能适应特定的本构定律和方程。在这些领域目前还需要开展大量的研究工作，详细情况将在第 12 章中讨论。

10.5.2　微制造工艺模拟

我们在本书的很多地方都已经提到了微制造工艺对 MEMS 和微系统结构的力学性能具有内在的影响。因此在有限元分析中，微制造工艺的综合和仿真就成为了一个关键的要求。人们已经提出了一种模拟微系统的微制造技术的有限元算法[Hsu 和 Sun，1998]，该算法在连续体的离散化过程中使用了赝单元。这种模拟技术要求微结构中的有限元(FE)网格包含两个部分：(1)一部分是衬底材料中的真实单元；(2)另一部分赝单元是用来模拟在微制造工艺过程中增加的或去除的材料。在诸如表面微加工技术或 LIGA 工艺等微制造工艺中，各种材料是通过“淀积”、“电镀”或衬底晶体的“外延生长”等手段增加到衬底上的，而在体硅微制造技术中，衬底上部分材料的去除是通过“腐蚀”的方式来实现的。在完成微制造工艺之前和之后通过改变赝单元指定的材料特性，就可以模拟第 9 章中介绍的 3 种微制造工艺了。下面将介绍这种模拟技术的工作原理。

表面微加工与 LIGA 工艺模拟　表面微加工技术是一种加法型的工艺，在这种工艺中所使用的赝单元称为“加单元”，即表明这种单元在微加工工艺中将被增加到衬底上。下面是工艺模拟的步骤：

第一步：如图 10.12 所示，将加单元包括在初始的有限元网格中。整个加单元构成的层厚要等于在衬底上构建的添加材料层的厚度。

第二步：设定加单元初始的材料特性具备以下特点：低的杨氏模量，$E=1$ Pa；高的屈服强度，$\sigma_y=10^6$ MPa；与衬底相同的热膨胀系数 $\alpha_{\text{substrate}}$；低的质量密度，$\rho=10^{-6}$ g/m^3。

第三步：在完成了某一步“淀积”、“电镀”或“熔融键合”等工艺之后，将真实材料层的特性设定到相应的加单元上。

第四步：在当前的加单元设定条件下，使用真实的材料层特性来计算整个有限元网格中的应力分布，同时其他余下的加单元仍然保持赝特性。在这种情况下，单元的刚度矩阵可以利用式(10.11)计算得到。

第五步：更新有限元网格中的应力、应变和节点的坐标。

第六步：更新刚度矩阵[K]。

第七步：对制造工艺中的下一个表面“层”重复进行上述计算。

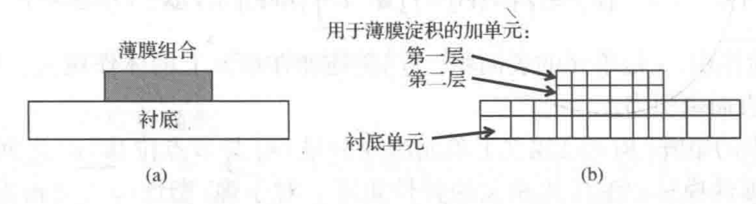


图 10.12　在加法型的微制造工艺中微结构的有限元离散化：(a)微结构；(b)离散化的微结构

体硅微制造工艺模拟　体硅微制造技术是一种减法型的工艺，它要求在所需的位置去除某些衬底材料。我们把这种工艺中使用的赝单元称为减单元，这些在有限元离散化过程中使用的减单元将在后续的分析过程中被去除。

第一步：如图 10.13 所示，把代表将要被腐蚀去除部分的减单元包括在有限元网格中。

第二步：将减单元的初始特性设定为与衬底材料的完全相同。依据工艺中所采用的腐蚀速率来确定减单元上的腐蚀面位置。

第三步：根据与腐蚀面位置（该位置具有临时节点坐标）重合的当前节点位置来调整式(10.11)中的[$B(\mathbf{r})$]矩阵。然后依据式(10.11)来计算简化的单元刚度：

$$[K_e] = \int_v [B(\mathbf{r}')]^{\mathrm{T}}[C][B(\mathbf{r}')]\,\mathrm{d}v$$

式中，$\mathbf{r}'$是[B]矩阵在临时节点坐标下的位置向量。

第四步：一旦腐蚀面位置从某个减单元的顶端过渡到其底端，该减单元就被整体切换成具有赝材料特性的赝单元。这种情况下的赝材料性能表现为：低的单元刚度矩阵，$[K_e] = 10^{-6}$；低的杨氏模量，$E = 1$ Pa；高的屈服强度，$\sigma_y = 10^6$ MPa；与衬底相同的热膨胀系数，$\alpha_{\text{substrate}}$；低的质量密度，$\rho = 10^{-6}$ g/m^3。

第五步：对后续的腐蚀工艺过程重复上述计算步骤。



图 10.13　在减法型的微制造工艺中微结构的有限元离散化：(a)微结构；(b)离散化的微结构

我们还可以将加单元和减单元组合在一起，来模拟第 9 章中介绍过的各种微制造工艺，如图 10.14 所示。

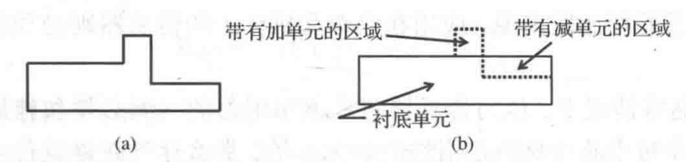


图 10.14　由加法型和减法型工艺共同制备的微结构的有限元离散化：(a)微结构；(b)离散化的微结构

基于与上面介绍的方法相类似的原理，文献[Hsu，1986]中开发了一个模拟算法，可以用来模拟固体中裂纹的生长过程[Kim 和 Hsu，1982]。一个流行的商业化有限元分析程序 ANSYS 已经被用来模拟硅衬底上二氧化硅层的腐蚀工艺[Hsu 和 Sun，1998]。我们可以采用该程序中的“新生”单元和“消亡”单元来模拟硅衬底的氧化过程，这两种单元有可能就是利用类似前面介绍的加单元和减单元的原理构造出来的。当我们要对一个工作在特定负载条件下的微型压力传感器芯片及薄膜进行应力和应变分析时，就可以首先通过模拟获得其残余应力和应变，并将这个残余应力和应变作为其初始的应力和应变。

10.6　微压力传感器硅芯片的设计

我们将通过一个与压力传感器硅芯片设计相关的案例研究来展示微器件的力学设计过程。硅芯片是微压力传感器中的关键部件，只有通过正确的力学设计才能确保这类传感器能够发挥其正常功能。

总体描述　在第2章中已经介绍了各种不同类型微压力传感器的工作原理。这里，我们将更加仔细地考察一下如何来开展某一种类型压力传感器的力学设计。图10.15所示为一个典型的方形硅芯片压力传感器剖面示意图，该芯片由方形的硅衬底构成，其中包含一个从衬底的某一面腐蚀进去的空腔。芯片上由于腐蚀而减薄的部分形成一个薄膜，当媒介在芯片的背面(即底面)施加压力时，该薄膜就会发生挠曲形变，而与这种挠曲形变相关的就是薄膜中承受的弯曲应力和切应力。薄膜中植入了压敏电阻，以便检测其中产生的应力。芯片最终通过环氧树脂粘结或阳极键合等特殊的键合方法，被安置在固定的底座上，这些具体的封装键合技术将在第11章中详细介绍。

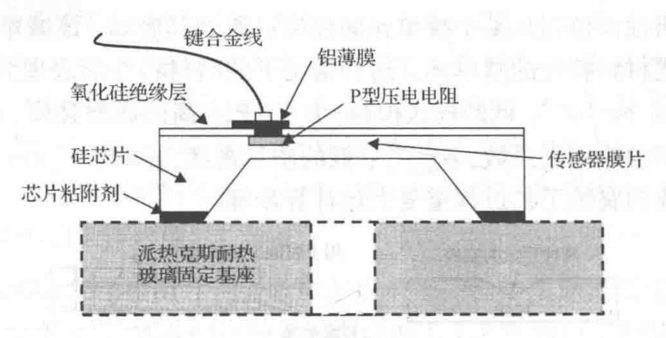


图10.15　一个典型的微压力传感器硅芯片

设计考虑　在着手开展芯片的实际设计分析工作之前，一个设计工程师还必须了解大量需要考虑的因素。这些因素主要包括以下内容。

1. **应用领域**：不同的应用领域往往意味着不同的用户群。与应用在实验室里高精度仪器中的各类传感器相比较来说，应用在汽车和机床上的传感器则必须能够适应更加恶劣的环境。
2. **工作媒介**：通常情况下，压力传感器芯片感知压力的一侧必须和施加压力的媒介相接触。如果媒介对于芯片材料是惰性的和无害的，那么这种接触就是可以接受的。不幸的是，很多这样的媒介都是不友好的和有毒的，例如汽车排放的尾气。在这样的情况下，就必须对芯片进行钝化防护，而芯片的力学设计就必须能够提供这样的保护。
3. **固定底座**：传感器一般都是安装在某个底座或管壳上。一个振动的底座就有可能导致芯片发生疲劳失效，因此在设计中就要设法将芯片的特征频率设计成比实际工作中预料的激励频率高很多。应用在汽车上的压力传感器的最低特征频率必须在100 Hz ~ 2 kHz之间。
4. **其他考虑**：还应该考虑到一些意外的情况，例如误操作时导致传感器意外跌落带来的机械冲击等。热冲击也可能是另外一种意外情况，这种情况也应该在设计中考虑到。

芯片的几何结构和尺寸　大多数压力传感器芯片都是正方形的。矩形和圆形芯片在早期也有所应用，但是在近期的产品中已经非常少见了。

芯片的尺寸必须认真地进行设计，因为它不仅会影响传感器产品的成本，而且也会影响其灵敏度性能。图10.16展示了一个正方形硅芯片上的关键设计尺寸。

如图所示，芯片的整体尺寸是$A \times A \times H$。芯片的厚度H受到硅晶圆片标准厚度的限制，例如直径100 mm硅晶圆片的厚度就是500 μm，其他尺寸硅晶圆片的厚度可以参见7.4.2节。首先必须确定一个合适的芯片高度，因为它要能够提供必要的隔离，以屏蔽固定底座对芯片可

能产生的机械影响。薄膜的尺寸是 $a \times a \times h$，其中长度 a 是由尺寸 b 和腐蚀倾角 54.74°共同决定的。如果对硅衬底的(100)晶面进行湿法腐蚀，就一定会形成这个倾角。另一方面，尺寸 b 取决于芯片"支撑脚"的大小 c，后者必须足够大，这样才能确保芯片粘合层(参见图10.15所示)处的应力保持在其塑性屈服强度以下。很显然，芯片上的所有尺寸之间都是相互关联的。

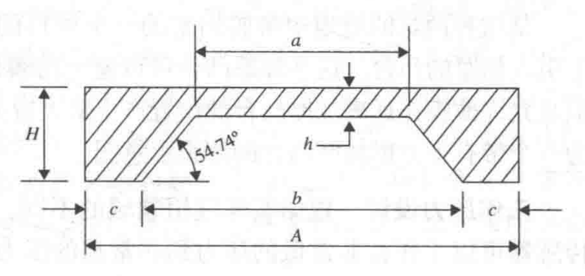


图10.16 一个正方形压力传感器芯片的关键尺寸

影响芯片尺寸的另一个因素是信号转换器的尺寸。通常用在压力传感器上的信号转换器有两种类型：压敏电阻器和电容器。这两种情况都要求芯片表面为信号转换器留有足够的空间。为了获得最好的信号传感效果，这些信号转换器必须从一些局域点发出信号，这也就要求或者芯片尺寸足够大以至于信号可以被看作是从局域点产生的，或者尽可能将转换器本身制作得非常小。因此芯片尺寸也就受到转换器尺寸的限制。

当然，决定芯片制造成本的一个因素就是芯片的整体尺寸。一般希望尽可能保持芯片的尺寸足够小，这样既可以降低材料成本，又可以减小其占用的空间。

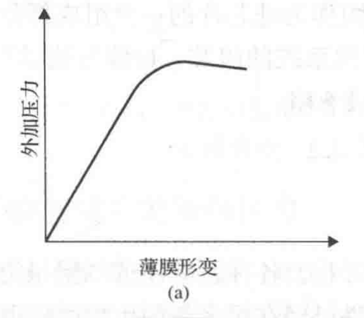
芯片的强度 我们已经说明，利用式(4.10)和式(4.11)可以估算出薄膜的最大弯曲应力和形变。还可以对这些方程稍做改变，将其写成如下形式：

$$\sigma_{\max} = C_1 P \left(\frac{a}{h}\right)^2 \tag{10.13}$$

$$W_{\max} = C_2 P \left(\frac{a^4}{h^3}\right) = C_2 P a \left(\frac{a}{h}\right)^3 \tag{10.14}$$

式中，C_1 和 C_2 是常数因子；P 是外加的压力。

从提高传感器性能的角度来看，最好能在薄膜中产生足够大的弯曲应力 $\sigma_{\max}$，这样才能从压敏电阻器上获得足够强的信号，这也就意味着薄膜必须很薄，即式(10.13)中的尺寸 h 必须很小。然而，较小的尺寸 h 将导致最大形变 $W_{\max}$ 的增加比 $\sigma_{\max}$ 的增加要快得多，如式(10.14)所示。较大的薄膜形变将会导致施加的压力和弯曲应力之间呈现非线性关系，由此导致输出信号如图10.17所示。这种非线性关系显然是传感器设计中不希望出现的。工程师们因此在薄膜的设计中面临着一种两难的选择：一方面他们需要足够大的弯曲应力，但是另一方面又需要保持尽可能小的薄膜形变。



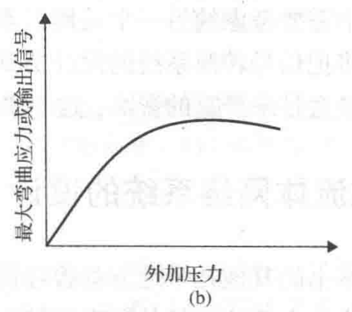
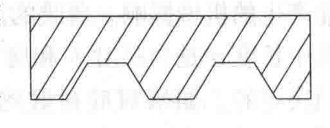


图10.17 压力传感器输出信号的线性度：(a)压力-形变曲线；(b)压力-输出信号曲线

从这种两难的境地中解脱出来的一个可行的办法就是在薄膜上引入加厚的凸台。这些加厚凸台可以避免薄膜出现过度的形变，但是允许薄膜在远离加厚凸台的位置产生最大应力。图10.18所示为一个带有正方形加厚凸台的薄膜示意图。



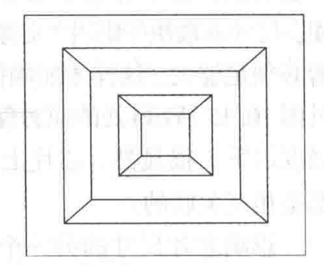


图10.18 带有正方形加厚凸台的硅芯片

工作压力设计 根据实际应用领域的不同，所设计的微压力传感器可以工作在非常低的压力到非常高的压力范围内。在汽车工业中，汽油发动机气缸中工作的微压力传感器的典型工作压力是10 MPa，而在柴油发动机气缸中的则是100 MPa，在制动液和液压悬挂系统中则是20 kPa。

平坦的薄膜最适合应用于工作在中等压力范围下的压力传感器，即从35 kPa到3.5 MPa之间，此时压敏电阻器的输出和外加压力之间存在着线性的变化关系[如图10.17(b)所示]，然而，这种我们所希望出现的情况在外加压力超出上述范围时并不总是存在。

低工作压力($P<30$ kPa)的情况 低的工作压力意味着需要更薄的薄膜[即意味着式(10.13)和式(10.14)中的h值比较小]。较薄的薄膜也意味着较小的薄膜尺寸(即图10.16中的尺寸a比较小)，这将导致较低的弯曲应力以及较低的信号输出。因此，为了产生较大的输出信号，就必须增大薄膜面积。而既大且薄的薄膜则会导致输出信号的非线性，正如我们在前面有关“芯片的强度”部分中所指出的那样。解决这个问题的一个可行的办法就是使用加厚的凸台，如图10.18所示。已经有报道，这种解决办法在测量较低压力的压力传感器中得到了应用，其测量范围为7 kPa，满量程输出电压为100 mV，线性度优于0.1%。

高工作压力($P>35$ MPa)的情况 在高工作压力的情况下要使用较厚的薄膜，这将意味着薄膜具有较低的a/h比值，这个较低的比值能够将薄膜中的主要应力从弯曲应力转变成切应力，因此压敏电阻输出信号与外加压力之间呈现出一种非线性关系。解决该问题的一个办法就是将压敏电阻器仔细定位在切应力最小的地方。使用局部加厚的凸台可以控制弯曲应力和切应力在薄膜中的分布。如图4.53中所展示的有限元分析方法可以辅助进行这样的设计。

过压设计 为了安全工作起见，微压力传感器经常设计成能够承载超过设计的工作压力10~30倍的过压。这种过高的压力显然会导致薄膜产生过度形变。为了避免这种情况的发生，在芯片中必须设计一个形变限制器或形变阻止器来防止薄膜在过压情况下发生过度的形变。

工作温度设计 正如4.4节中所述，温度将会影响材料的强度，并在微结构中诱生热应力。在设计中需要考虑的另一个关键因素是压敏电阻作为硅芯片的一个组成部分也具有温度效应。我们将把信号转换系统的设计留到第11章“微系统的组装、封装与测试”中介绍。温度对信号转换会带来严重的影响，这一事实不应该被忽略。

10.7 微流体网络系统的设计

我们在本书的其他几个地方都曾经提到，随着工业上各种新应用的频繁报道，生物微机电系统正成为一个迅速成长的研究领域。微流体器件已经在很多新的生物微机电系统中成为主要的部件，特别是最近几年，毛细电泳芯片已经在制药、遗传学和人类基因组研究等领域

获得了越来越广泛的应用。毛细电泳芯片是一种能够进行化学和生物医学分析的微流体系统，并且能够只取微量的试样就可以立刻测出其中的成分。由于整个毛细管电泳分析系统是和信号处理电路集成在同一块芯片上的，因此可以进行大批量生产，从而大大降低了生产成本。此外，这些系统都是一次性使用的，因此就省去了所有的维护保养费用。绝大多数这样的系统都是非常微小的，以至于我们采用微制造技术很容易将 1000 个并行的毛细管电泳分析系统组装集成在一个独立的芯片上。上述这些特性已经使得毛细管电泳芯片成为实现前面提到的各种功能的最高效便捷的分析工具。

正如我们在第 3 章中介绍的那样，毛细管电泳涉及到电渗过程和电泳过程的结合，而这两个过程均包括了流体在外加电场作用下的运动。电渗过程使得水溶液流过一个固定的固体表面，这要求在固液交界面处建立一个带电的双层结构，其形成的电渗流截面上的速度分布几乎是平的；另一方面，电泳过程并不会从整体上移动流体，相反，它只是在外加电场的作用下移动缓冲溶液中的带电成分。

典型的毛细管电泳芯片是由网络化的毛细管道或沟槽组成的，这些毛细管道常见的剖面图如图 10.19 所示。毛细管道的直径一般小于 100 μm，而毛细沟槽的宽度则一般是 30 ~ 50 μm，其深度则介于 10 ~ 30 μm。

毛细管道的长度一般介于几毫米到几厘米之间。这些管道通常是采用腐蚀工艺制作出来的，并且采用了环氧树脂密封胶来封住管道以防止液体的外泄，如图 10.19 所示。图 10.19(a)、图 10.19(b)和图 10.19(c)所示的是封闭的毛细管道，它们都是用微制造技术先做出其中的一半，然后再利用各种键合技术将两个一半键合到一起，我们将在第 11 章中介绍这种键合技术。图 10.19(d)、图 10.19(e)和图 10.19(f)中所示的开放式沟槽则被键合到玻璃衬底上并用环氧树脂将其键合处密封[Harrison 和 Glavina，1993]，这些管道和沟槽必须和衬底之间保持绝缘，以避免分析时在电渗和电泳过程中出现电压击穿现象。

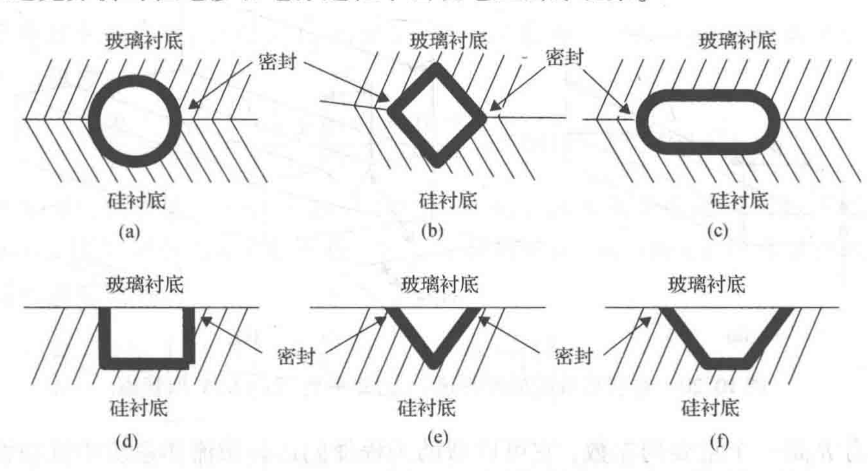


图 10.19 典型的毛细管截面示意图：(a)圆形管道；(b)菱形管道；(c)跑道形管道；(d)矩形沟槽；(e)V形沟槽；(f)梯形沟槽

10.7.1 微管道中的流动阻力

我们知道毛细管道及沟槽的截面可能是多种多样的，如图 10.19 所示。之所以使用各种非圆形截面的管道，是因为它们可以很容易地采用微加工技术(例如腐蚀工艺)制造出来。这些非圆形的管道截面通常需要采用一些特殊的计算公式来估算管道中的流动阻力。

流动阻力 R 定义为沿着管道特定长度上的压差 ΔP 与媒介的体积流速 Q 之比。数学上可以表示为下面的表达式[Kovacs, 1998]：

$$R = \frac{\Delta P}{Q} \tag{10.15}$$

半径为 a 的圆形导管中的流动阻力可以很方便地由式(5.17)推出：

$$R = \frac{8\mu L}{\pi a^4} \tag{10.16a}$$

而图10.20(a)所示的矩形管道中的流动阻力公式则可以表示为：

$$R = \frac{12\mu L}{wh^3} \tag{10.16b}$$

上式适用于截面具有较大深宽比的矩形管道，而下式

$$R = \frac{12\mu L}{wh^3}\left\{1 - \frac{h}{w}\left[\frac{192}{\pi^5}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^5}\tanh\left(\frac{n\pi w}{h}\right)\right]\right\}^{-1} \tag{10.16c}$$

则适用于截面具有较小深宽比的矩形管道。

对于如图10.20(b)所示的V形管道而言，其中的流动阻力可以表示为：

$$R = \frac{17.4L\mu}{w^4} \tag{10.16d}$$

如果我们在式(10.15)中将压差的单位取为 N/m^2，将体积流速的单位取为 m^3/s，则流动阻力 R 的单位为 $N \cdot s/m^5$。流动阻力 R 的另一个单位是 $Pa/m^3/s$，这个单位表明 R 的物理含义是在单位体积流速(以 m^3/s 为单位)上的压差(以帕斯卡为单位)。

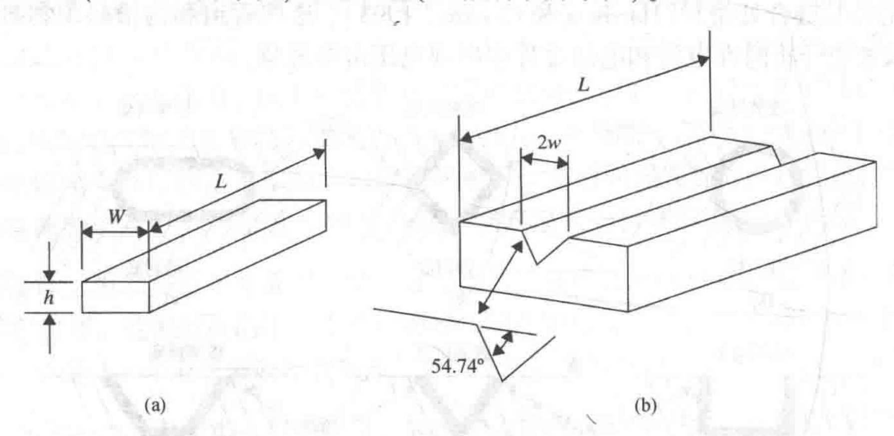


图10.20　非圆形截面的微管道：(a)矩形管道；(b)V形管道

流动阻力 R 是一个重要的参数，它可以帮助工程师们选择微流体系统中流动管道截面的几何形状。下面这个例子将展示这个具体的选择过程。

例题10.2　如图10.21所示，计算3种具有相同水力学直径 d_h 但是截面形状不同的微型管道中的水流阻力。圆形毛细管的内半径 $a = 15\ \mu m$。表4.3中给出室温下水的动力黏度 μ 是 $1001.65 \times 10^{-6}\ N \cdot s/m^2$。

解答： 首先来确定图10.21(b)中矩形管道和图10.21(c)中V形管道的截面尺寸，以确保这些管道和图10.21(a)中的圆形管道具有相同的水力学直径 d_h。

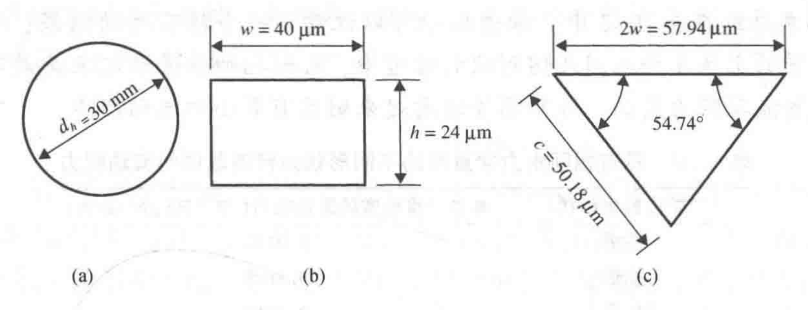


图 10.21　微流体管道：(a)圆形；(b)矩形；(c)V 形

采用第 5 章中给出的式(5.19)可以计算出非圆形截面管道的水力学直径。据此可以分别计算出矩形截面和 V 形截面管道的水力学直径。

图 10.21(b)所示的矩形截面管道的水力学直径为：

$$d_h = \frac{4(wh)}{2(w+h)} = \frac{2wh}{w+h}$$

图 10.21(c)所示的 V 形截面管道的水力学直径为：

$$d_h = \frac{4wh}{2c+2w}$$

利用式(5.19)可以很容易证明圆形截面管道的水力学直径为 $d_h = 2a$。

在上面给出的公式中，令 $d_h = 2a = 30$ μm，令矩形管道宽度 $w = 40$ μm，如图 10.21 所示，我们就可以求出矩形管道的 $h = 24$ μm，V 形沟槽的 $w = 28.9$ μm。

当圆形毛细管道和两个微沟槽管道的尺寸都确定之后，就可以按照下列步骤来计算这些管道的流动阻力 R。

1. 对于圆形毛细管道(如图 5.12 所示)：可以用采用式(10.16a)来计算单位长度管道上的流动阻力：

$$\frac{R}{L} = \frac{8\mu}{\pi a^4} = \frac{8 \times 1001.65 \times 10^{-6}}{3.14 \times (15 \times 10^{-6})^4} = 5.0416 \times 10^{16} \text{ Pa/m}^3\text{/s/m}$$

2. 对于矩形沟槽管道[如图 10.21(b)所示]：我们注意到该管道截面的深宽比为 $W/h = 1.6667$，这是一个比较小的数值，因此可以利用式(10.16c)来估算单位长度矩形沟槽管道的流动阻力：

$$\frac{R}{L} = \frac{12\mu}{wh^3}\left\{1 - \frac{h}{w}\left[\frac{192}{\pi^5}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^5}\tanh\left(\frac{n\pi w}{h}\right)\right]\right\}^{-1}$$

$$= \frac{12 \times 1001.6 \times 10^{-6}}{(40 \times 10^{-6})(24 \times 10^{-6})^3}\left\{1 - \frac{24}{40}\left[0.6274\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^5}\tanh(5.233n)\right]\right\}^{-1}$$

$$= 3.5183 \times 10^{16} \text{ Pa/m}^3\text{/s/m}$$

3. 对于 V 形沟槽管道[如图 10.21(c)所示]：利用式(10.16d)可以估算其单位长度沟槽管道的流动阻力：

$$\frac{R}{L} = \frac{17.4\mu}{W^4} = \frac{17.4 \times 1001.65 \times 10^{-6}}{(28.97 \times 10^{-6})^4} = 2.4744 \times 10^{16} \text{ Pa/m}^3\text{/s/m}$$

把上述结果总结在表10.2中。读者从中可以注意到一个很有趣的结果，对于微流体系统来说，在所选的上述3种不同几何形状的管道中，圆形毛细管道看起来是最不理想的一种选择，因为它的流动阻力最高，而V形管道看起来则具有最小的流动阻力。

表10.2　具有相同水力学直径的不同形状微管道截面的流动阻力

管道截面形状	单位长度管道的流动阻力(10^{16} Pa/m³/s/m)
圆形	5.0416
矩形	3.5183
V形	2.4744

10.7.2　毛细管电泳网络系统

正如我们在本节开头所提到的，毛细管电泳系统对于快速准确的化学和生物试样分析来说是一个高效的(并且也是强有力的)工具。最简单的毛细管电泳网络是由两个成一定角度的交叉管道组成的，图10.22所示是一个毛细管电泳网络的平面示意图，其中的一条管道叫作注射管道，供含有待分离和检测成分的分析物通过；另一条管道叫作分离管道，它是用来分离试样中的特定成分的。注射管道的左边连接着样品池，其右边则连接着废液池，而分离管道的上部连接着缓冲溶液池，其下部则连接着废液池。

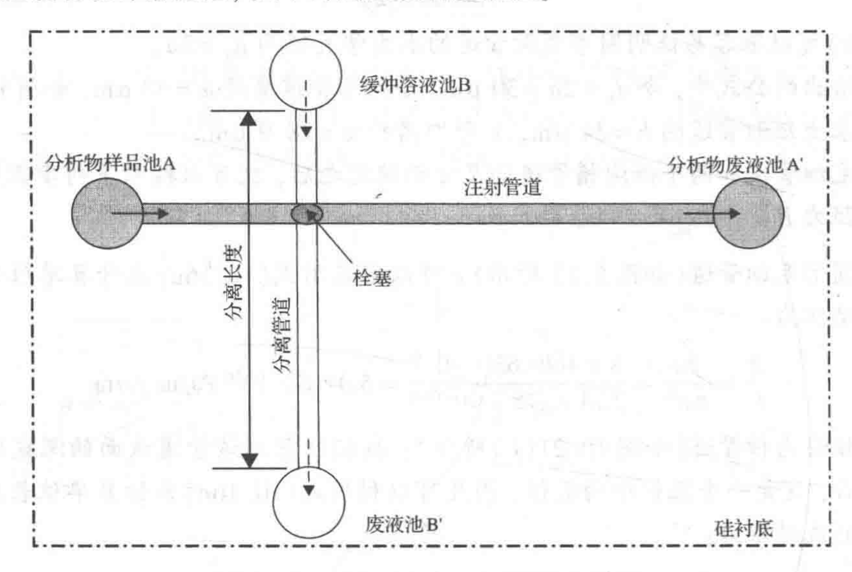


图10.22　毛细管电泳网络的平面示意图

毛细管电泳分析的一般步骤如下：

1. 在样品池A和废液池A′之间施加150～1500 V/cm的电场，驱使含有待测成分的分析溶液从样品池A注入到注射管道中，外加电压使得待测溶液通过电渗过程从样品池A流向废液池A′。如图10.22所示，在两个毛细管相交叉的地方形成了一个试样的栓塞。在上述注射过程中并不发生试样的分离。
2. 然后在缓冲溶液池B和废液池B′之间施加一个电场，因此交叉口处的试样栓塞开始在分离管道中移动，流体开始出现电泳现象。在这个过程中，流体中的不同成分根据它们各自的离子迁移率(或电渗淌度)分别以不同的速度流动。在这一段分离管道中，待

测流体中的不同成分就被分离开来。试样中第 i 种成分离子的迁移率 ω_i 可以通过下面的公式来进行估算[Manz 等人, 1994]:

$$\omega_i = \frac{z_i q}{6\pi r_i \mu} \tag{10.17}$$

式中, z_i是离子 i 所带的电荷量; r_i是该离子的半径; μ 是该离子在缓冲溶液中的动力黏度。正如式(3.12)中所给出的那样, 一个电子所带的电荷量 q 为 1.6022×10^{-19} C。

3. 从缓冲溶液中分离出来的成分可以利用安培计电化学探测器或者荧光探测器将其鉴别出来, 具体的检测办法可以参考[Harrison 和 Glavina, 1993]以及[Woolley 和 Mathies, 1994]等文献。

10.7.3 毛细管电泳网络系统的数学模型

正如上面这个标题所体现的那样, 毛细管电泳过程的数学模型及其分析是一件非常复杂的事情, 它包括了对流、扩散和电迁移之间的相互耦合。对流是一种包含了可能会引起物质温度或者其他物理特性发生变化的物质运动现象。我们可以设想, 在注射过程中分析物发生电泳运动时会出现对流现象, 随后在缓冲液中进行分析物的成分分离过程中也会出现对流现象。扩散现象通常发生在交叉口的栓塞分析物与缓冲溶液之间, 不过这个过程可能会因为两种物质没有足够的时间进行混合而变得非常不明显[Patankar 和 Hu, 1998]。电迁移是用来模拟由于外加电场而引起溶液中离子的运动过程。

研究人员已经在毛细管电泳过程的数学模型方面开展了大量的工作。下面给出的是在上述模型与分析方面具有参考价值的部分研究人员名单列表: [Saville 和 Palusinski, 1986]、[Manz 等人, 1994]、[Jiang 等人, 1995]、[Williams 和 Vigh, 1996]、[Patankar 和 Hu, 1998]及[Krishnamoorthy 和 Giridharan, 2000]。

下面给出的是模拟分析物的电泳流动过程需要用到的控制方程, 其中的分析物就包含了位于毛细管网络交叉口处(在该处形成试样栓塞)与缓冲溶液混合在一起的各种待检测成分[Krishnamoorthy 和 Giridharan, 2000]。

决定成分 i 浓度变化率的对流方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -(\nabla\cdot\mathbf{J}_i) + \mathbf{r} \tag{10.18}$$

式中, C_i是溶液中成分 i 的浓度; t 是进入对流过程的时间; $\mathbf{r}$ 是该成分的产生速率; 流量矢量 $\mathbf{J}_i$由下式确定:

$$\mathbf{J}_i = \mathbf{V}C_i - z_i\omega_i C_i\,\nabla\phi - D\,\nabla C_i \tag{10.19}$$

式中, $\mathbf{V}$ 是溶液中成分 i 的速度矢量, 例如在 x-y 平面内沿着 x 方向和 y 方向流动的速度分量分别为 $V_x(x,y)$ 和 $V_y(x,y)$; z_i是离子 i 的化合价; ω_i是式(10.17)所示的第 i 种成分的电渗淌度(或迁移率); ϕ 是外加的电压; D_i是溶液中第 i 种成分的扩散系数。

在给一个稳态过程建模时, 我们通常会忽略式(10.18)中第 i 种成分的产生速率 $\mathbf{r}$。而式(10.19)中的电场则可以通过求解下面的微分方程获得:

$$\nabla\cdot(\sigma\nabla\phi) = 0 \tag{10.20}$$

式中, 电导率 σ 可由下式确定:

$$\sigma = F\sum_i z_i^2 \omega_i C_i \tag{10.21}$$

式中，F 是法拉第常数，其数值为 9.648×10^4 C/mol。

由于电渗淌度(或迁移率)引起的整体流速由下式给出：

$$V_0 = \omega_0 \nabla\phi \tag{10.22}$$

式中，V_0是强加在管壁上的滑移速度；ω_0则是特定成分的电渗淌度(或迁移率)。

10.7.4 设计案例：毛细管电泳网络系统

下面给出的是一个假想的设计案例，它可以展示毛细管电泳的过程，是由 Alabama 州 Huntsville 市计算流体动力学研究公司的 Krishnamoorthy 开发的这个设计案例[私人通信，2000]，该毛细管电泳网络的几何结构和尺寸如图10.23所示，其中两个管道的截面都是矩形的，宽度为20 μm，深度为15 μm。待分析物中包含3种不同成分，它们分别具有不同的电渗淌度(或迁移率)，其中成分A的 $\omega_1 = 2\times10^{-8}$ m²/(V·s)，成分B的 $\omega_2 = 4\times10^{-8}$ m²/(V·s)，成分C的 $\omega_3 = 6\times10^{-8}$ m²/(V·s)。假设3种成分都带有负电荷。为了简化分析，假设流动只发生在 x-y 平面的二维空间内，如图10.23所示。这个过程发生在分析物达到平衡条件之后，这样一来式(10.18)中的产生速率就可以省略了。在这个设计案例中我们使用了上述计算流体动力学研究公司销售的计算流体动力学程序 ACE⁺。

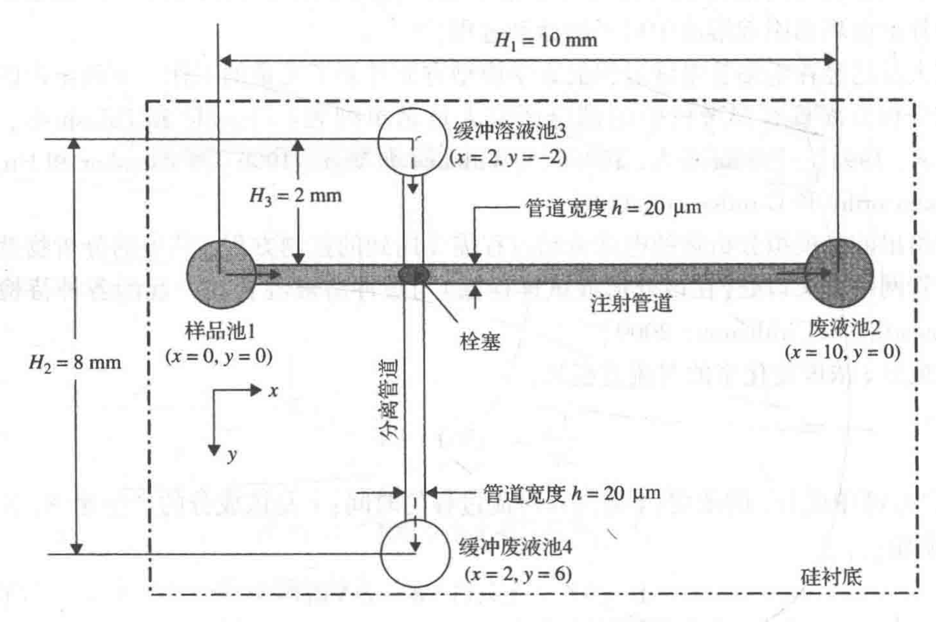


图10.23 一个设计案例研究的毛细管电泳现象

由于假设流动是限制在 x-y 平面内的，因此式(10.18)中的速度矢量 **V** 就包含有两个分量 $V_x(x,y)$ 和 $V_y(x,y)$，分别沿着 x 方向和 y 方向，由此可以将式(10.18)改写成二维形式：

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (V_x + V_{ex})\frac{\partial C_i}{\partial x} + (V_y + V_{ey})\frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_i\frac{\partial C_i}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(D_i\frac{\partial C_i}{\partial y}\right) + \dot{r}_i \tag{10.23}$$

式中，C_i是溶液中成分 i 的浓度；t 是进入对流过程的时间；$V_{ex} = -\omega_i z_i(\partial\phi/\partial x)$，它是沿着 x 方向的电迁移分量(或漂移速率)；$V_{ey} = -\omega_i z_i(\partial\phi/\partial y)$，它是沿着 y 方向的电迁移分量

(或漂移速率)；z_i是第 i 种成分离子的化合价；ω_i是式(10.17)中第 i 种成分的电渗淌度(或迁移率)；ϕ 是外加电压；D_i是溶液中第 i 种成分的扩散系数；$\dot{r}_i$是第 i 种成分的产生速率。

在实际计算中忽略了式(10.23)中第 i 种成分的产生速率 $\dot{r}_i$，理由同上。

电场 ϕ 和式(10.23)中给出的 V_{ex}和 V_{ey}一样，可以通过求解下面的微分方程得到：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)=0 \tag{10.24}$$

式中，电导率 σ 的定义为：

$$\sigma = F\sum_i z_i^2\omega_i C_i \tag{10.25}$$

式中，F 是法拉第常数。

仔细观察上面这些公式可以发现式(10.23)、式(10.24)和式(10.25)之间都是相互耦合的，而且采用传统的求解方法来求解这些相互耦合的方程组非常烦琐和耗时。因此建立在计算流体动力学原理基础上的计算流体动力学 ACE$^+$程序被用来求解这个设计案例的数值解。

在使用上面的计算流体动力学 ACE$^+$程序时，整个分离过程是在 10.7.2 节中针对毛细管电泳过程的一般步骤讨论的电动切换技术的帮助下完成的。这个技术包括以下两个循环：

1. **注射循环**：保持注射管道中的电场，直到试样流过交叉口为止。

2. **分离循环**：在所需的时间长度内保持分离管道中的电场，直到完成分离过程。

外加电场的强度取决于分析物的属性、交叉口处试样栓塞的体积以及系统的几何尺寸。

图 10.24 展示了用计算流体动力学 ACE$^+$程序预测的在注射循环结束时的试样等高线图。在该循环中，图 10.23 中的样品池 1 接地，而废液池 2 保持在 250 V。缓冲溶液池 3 和缓冲废液池 4 则分别保持在 30 V 和 0 V。注射管道中的强电场驱使试样从样品池 1 流向废液池 2，当试样到达交叉点时，它将因为分离管道中的弱电场而受到挤压，因此试样在交叉点处呈现梯形的形状(参见图 10.24 所示)。这种在流场中的交叉点使用挤压手段产生特定体积试样的方法通常称为挤压加载技术[Culbertson 等人，1998]，这个过程有时也被称为电动聚焦。流场中的挤压现象是由管道的几何形状和方向决定的交叉点处的非均匀电场引起的。

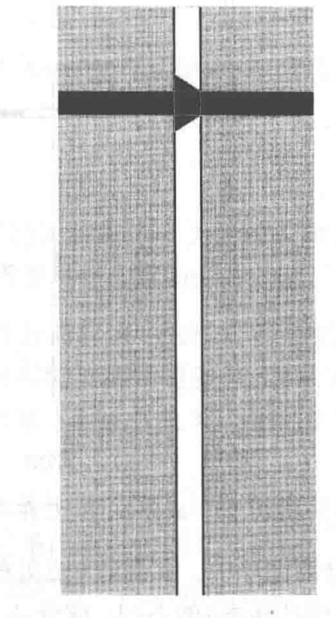


图 10.24　包括 A、B 和 C 成分的试样在注射循环结束时的等高线图

电泳过程中的第二个循环是从试样中分离出不同的成分。在试样到达交叉点之后，外加电压由试样加载模式切换为试样分离模式。此时 250 V 的电势被施加到缓冲废液池 4 上，而缓冲溶液池 3 则接地。样品池 1 和废液池 2 则分别保持 70 V 和 100 V 的电势。之所以在分离过程中还维持注样管道中的一个弱电场，是为了避免试样从注射管道泄漏到分离管道中，从而

可以获得一个干净的分离。对于3个不同的时间点，即时间t分别等于0.1 s、0.3 s和0.5 s时，采用计算流体动力学模拟得到的结果分别如图10.25(a)、图10.25(b)和图10.25(c)所示。这些图展示了成分A、B和C的等高线分布以及各成分沿着分离管道中的浓度变化曲线。

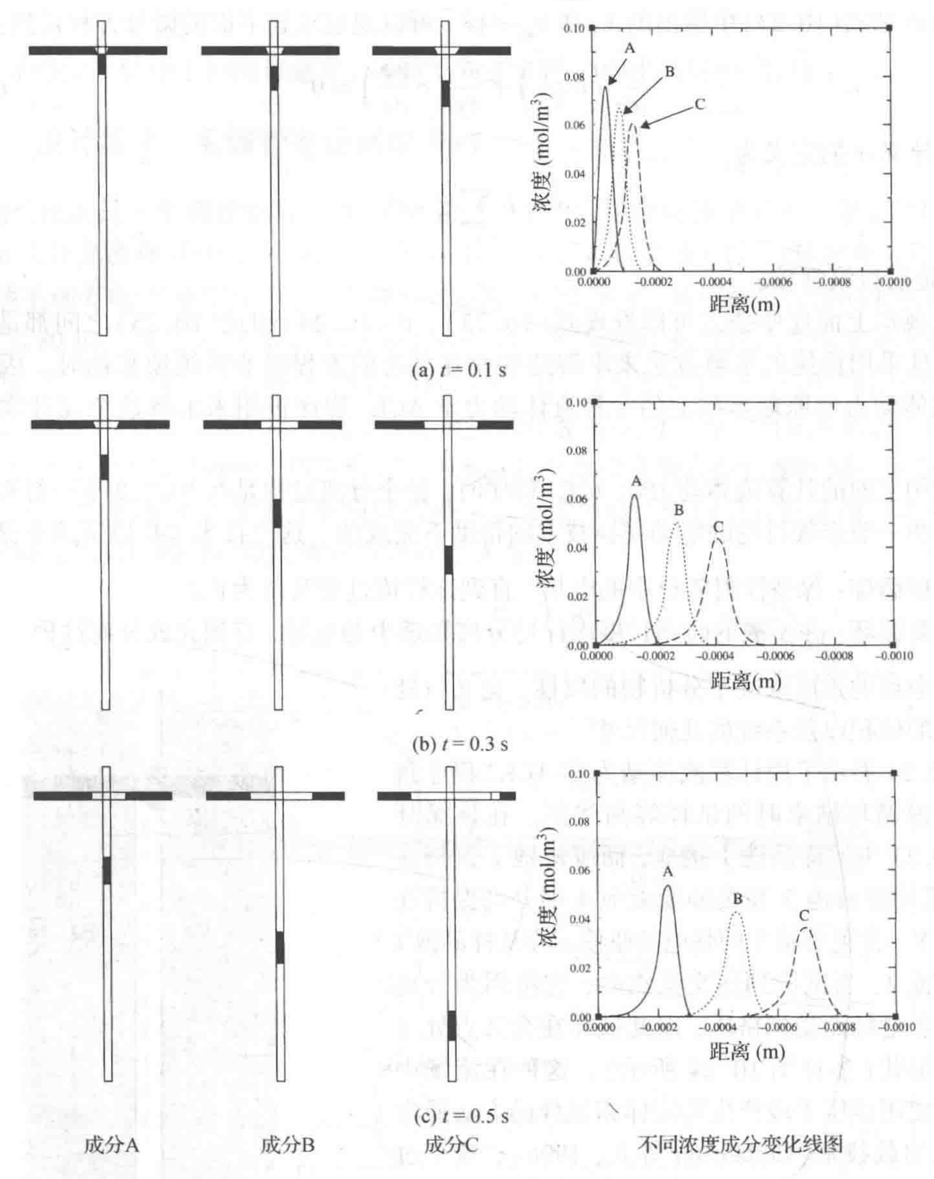


图10.25　成分A、B、C在不同时刻的等高线分布：(a)0.1 s；(b)0.3 s；(c)0.5 s

在分离循环中，位于交叉点处的试样开始流进分离管道。在试样流动的过程中，由于电渗淌度(或迁移率)的不同，成分A、B和C将以不同的速度移动。不出我们所料，图10.25中已经清楚地显示出，在一个给定的时间长度内，某种成分迁移的距离是和该成分的电渗淌度(或迁移率)成正比关系的，从图中可见，成分C由于具有最高的电渗淌度(或迁移率)，因此将最先被安培计电化学探测器或者荧光探测器检测出来。

10.7.5　弯曲管道中的毛细管电泳现象

我们注意到图10.25中各种成分的峰值浓度随着时间的推移而逐渐降低，这种现象称为带宽扩展或弥散效应，这涉及到分析物的浓度在沿着微管道流动时的稀释过程。这种试样成分的弥散现象在弯曲管道的毛细管电泳过程中变得更加显著，因为弯曲管道中同一成分的浓度在靠近管道内侧处要比靠近管道外侧处高。这种弯曲型的管道对于很多需要较长分离管道的电泳过程来说是一个实际可行的解决办法。有很多应用要求分离大量不同的成分，在这种情况下典型的分离时间长达200 s左右，与之相应的分离长度长达1～2 m，因此有一些分析系统在流体流动的通道上就包含了很多个转角，这样才能够确保整个系统不致占用太多的空间。图10.26所示就是一个包含了弯曲型管道的毛细管电泳系统。

弥散/扩散现象是导致毛细管电泳过程中带宽扩展的主要原因。一个非均匀的电场也可能造成试样中的不同位置处以不同的速度迁移［Culbertson等人，1998］，从而引起带宽扩展效应。非均匀电场的出现主要是由于管道几何形状的弯曲造成的。举例来说，我们考虑一个矩形的试样栓塞在电泳的作用下沿着弯曲的管道运动，如果弯曲管道的两端之间保持恒定的电压，那么沿着弯曲管道的内侧更高的电流密度就会导致试样栓塞的内侧部分比外侧部分迁移得更快，因此试样就会变成一个高度扭曲的平行四边形的形状，最终导致带宽扩展现象。文献［Krishnamoorthy 和 Giridharan，2000］中采用矩形截面的S形管道对这个现象进行了研究。

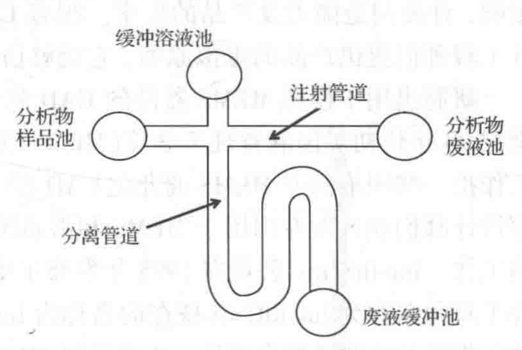


图10.26　用于毛细管电泳过程的弯曲型分离管道

10.7.6　毛细管电泳过程中的设计问题

就像10.7.4节中给出的那个实例一样，一个时间精确的计算流体动力学模拟可以帮助工程师们更好地设计和优化毛细管电泳装置。下面是一些需要引起注意的设计问题：

1. 定义一个最佳的电动注射系统的主要参数就是试样在分离管道中的形状和宽度。在注射管道的交叉点上，试样的形状越宽，获得所需分辨率的分离管道就越长，而由于试样扩散的缘故，较长的管道就会引起更严重的弥散现象。因此在交叉点处希望尽可能获得细而窄的试样。
2. 试样栓塞的形状受管道交叉点几何结构和外加电场的影响非常大。计算流体动力学的模拟分析将使得设计师们能够选择出合适的电压设置条件和管道的几何结构，例如长度、截面积，以及交叉的方向，以便在管道的交叉点处获得窄而细的样品带。
3. 计算流体动力学分析还可以帮助设计师们在电泳过程中选择合适的分离管道长度和每个循环的时间周期，以便在分离过程中获得所需要的分辨率。

因此通过利用计算机模拟来理解不同物理现象之间的相互作用，将对微芯片的优化设计起到很好的帮助作用，这种优化将在毛细管电泳片上微流体系统的紧凑性与其分离效果之间做出合适的折中。

10.8 计算机辅助设计

10.8.1 为什么要用计算机辅助设计

到目前为止，我们已经学习了 MEMS 和微系统工程设计中的很多方面，并了解到了其复杂的程度。通常开发一个新的微系统产品平均需要5年时间，而要把这个产品推入市场可能还要再花5年时间。这一冗长的开发和生产周期近年来被商业化的计算机辅助设计(CAD)软件包大大地缩短了。CAD 技术的主要优点是可以加速微系统产品的设计流程，满足苛刻的市场时间条件。一个好的 CAD 软件包还可以帮助设计工程师们快速地评估设计变更带来的影响，评测制造能力及产品的良率。很多 CAD 软件包的实体建模和动画制作能力能够为设计工程师们提供产品的虚拟原型，它能够仿真出实际产品所希望具有的功能和性能。

研制出用于模拟 MEMS 器件的 CAD 软件工具的最初努力起源于20世纪80年代末/20世纪90年代初美国麻省理工学院(MIT)开发的 MEMCAD 程序包[Gilbert 等人，1996]。这项工作把一些现成的非 MEMS 商业化 CAD 程序包与微结构的设计特点结合起来，由此开始，程序设计师们在开发专门用于 MEMS 和微系统设计的商业化 CAD 程序包方面已经开展了大量的工作。IntelliSense 公司在1995年发布了第一款专门用于 MEMS 的商业化 CAD 工具，该软件工具的名称为 IntelliCad(现在的名称为 IntelliSuite)。1996年 Microcosm Technologies 公司从 MIT 获得了软件授权许可证，并将其以 MEMCAD 的名字出售。在其他不包括器件分析的商业化 CAD 工具中，还有 Tanner 公司和 MEMSCaP 公司的 MEMSPro 软件。

10.8.2 用于微系统的 CAD 软件包是什么

尽管用于微系统的 CAD 软件包还处在不断的研发和完善之中，但是一个有发展前景的 CAD 软件包至少应该包括3个主要的交互数据库：(1)机电设计数据库；(2)材料数据库；(3)制造工艺数据库。一个包含上述数据库的通用 CAD 软件包所涵盖的内容大致如图10.27所示。

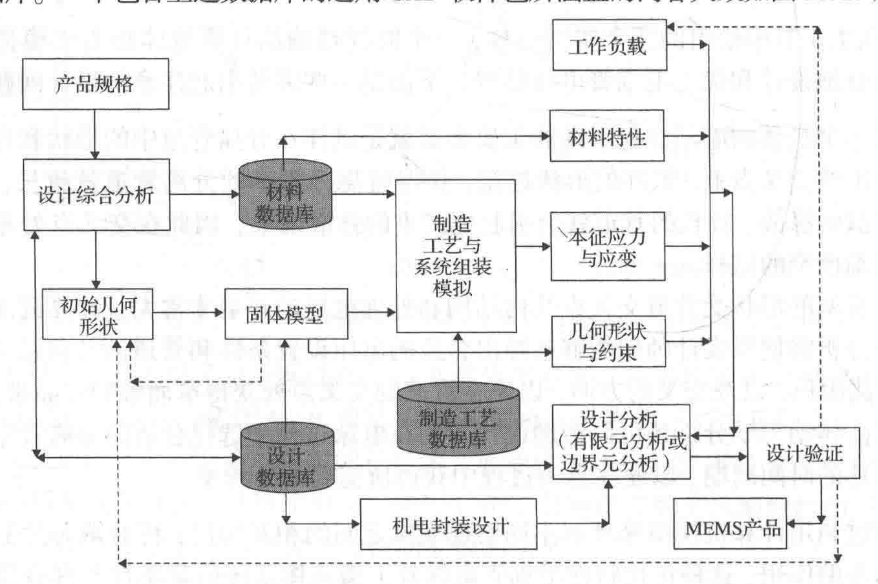


图10.27 用于微系统产品设计的 CAD 软件包总体结构

正如我们在图10.27中所看到的，设计数据库可以提供必要的信息和工具，例如用于设计综合的推理机、用于有限元分析和边界元分析的程序代码以及用于其他设计考虑的数据表格和曲线图等。在用于微系统的CAD软件中，对材料数据库的需求是显而易见的，因为微系统中用到的许多材料的性能参数在传统的材料手册中都很难查到。这样的一个数据库应该包括完整的材料性能信息，例如表7.3给出的那些材料性能参数就应该都包括在内。很多这样的性能参数应该以二维或三维曲线的形式给出，如图10.28和图10.29所示。它还应该包括信号转换元件的性能参数，例如压电材料和压阻材料的性能参数。

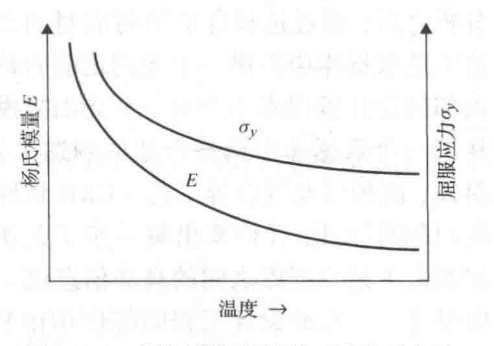


图10.28 材料性能参数的二维表示方法

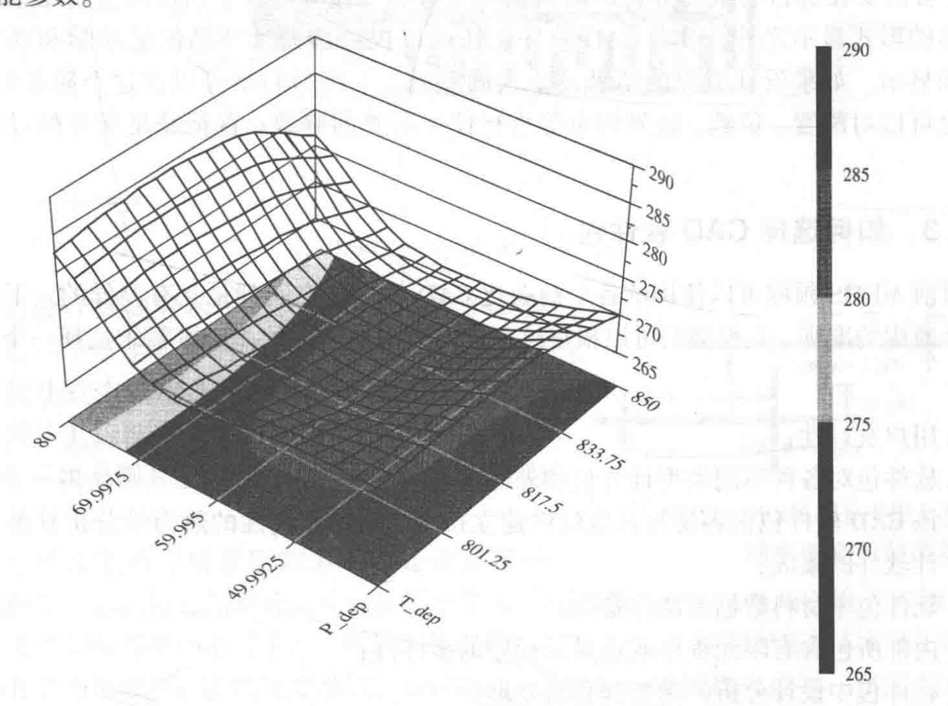


图10.29 材料性能参数的三维表示方法(经位于Wilmington，MA的IntelliSense公司许可使用)

图10.29给出了在不同温度和不同压力条件下氮化硅材料杨氏模量的变化情况，图中以三维图形的形式给出了杨氏模量的变化。

制造工艺数据库是微系统设计所独有的，它包含了我们在第8章和第9章中专门选择出来的各种加工和制造工艺的所有模拟仿真结果。这个数据库还应该包括硅片的处理条件，例如光刻工艺和薄膜淀积工艺所要求的清洗工艺。这些制造工艺模拟仿真的结果经常会包含一些固有的残余应力和应变以及其他的本征应力，这些数据往往被用作后续设计分析的输入条件，而这些设计分析则既可能针对正常的工作条件，也包括过载条件。工程师们可以利用CAD软件包中提供的实体模型选项来将其所设计的产品实现三维可视化。大多数CAD软件包都预备有三维动画功能，它使得工程师们可以通过虚拟样机来实现其操作功能的可视化，例如可以看见梳状驱动致动器的动作。

图10.27所示的流程图可以说是不言自明的。设计工程师们在完成了产品的设计综合分析之后，通过选择合适的衬底材料就会首先构建一个工艺流程表。CAD软件包将从制造工艺数据库中提供一个光刻之前的衬底处理工艺方案，然后就会从外部资源输入或者从内部的设计数据库中产生一个光刻掩模，用于后续在衬底上的光刻工艺。设计师们还可以从同一个数据库中选择合适的制造工艺流程或者工艺步骤，包括氧化、扩散、离子注入、腐蚀、淀积以及键合等工艺。CAD软件包能够提供所选择工艺的详细信息，例如腐蚀工艺所用的腐蚀液，并估算出每一步工艺所需要的时间。CAD软件包还能够提供材料数据库和制造工艺数据库之间的自动信息流。一旦确定了整个制造工艺流程之后，就可以开始机电设计了。在此设计工程师将使用由软件包构造的实体模型来自动产生出利用有限元方法进行机电分析所需要的网格。根据所设计产品属性的不同，CAD软件包既可以完成结构的热状态和机械强度的有限元分析，也可以对涉及到致动的产品进行静电分析和电磁分析，后者需要在进行有限元分析的时候输入电势和电流等条件。所有的分析结果除了能够以图形的形式显示之外，很多CAD软件包还可以提供所设计产品的运动学和动力学效应的动画显示。如果设计流程的结果是令人满意的，工程师们就可以在这个阶段结束设计，当然也可以对配置、负载、边界约束等进行任何必要的修改，直至满足所有的设计目标或标准。

10.8.3 如何选择CAD软件包

目前MEMS领域可以使用的各个商业化CAD软件包之间都是互有差异的。下面给出的是一个通用的准则，工程师们可以根据这个准则为他们特定的MEMS需求选择一个合适的软件包：

1. 用户友好性；
2. 软件包对各种不同类型计算机和外部设备的适应性；
3. 该CAD软件包很容易与其他软件建立接口，例如非线性的热力学分析软件与电路设计软件的集成；
4. 软件包中材料数据库的完备性；
5. 内部所包含有限元程序或边界元程序的多样性；
6. 软件包中设计分析的前处理和后处理；
7. 从实体模型中生成光刻掩模的能力；
8. 提供设计优化的能力；
9. 具有模拟仿真和动画显示的能力；
10. 购买或获得授权使用及维护的成本。

10.8.4 利用CAD软件完成的设计实例

在一个学生实习的项目[Griegor等人，2000]中，使用商用化的CAD软件包IntelliSuite设计了一个微细胞夹钳。有关该软件包的一般性描述可以参见已经公开发表的文献[He等人，1997]。与图10.27展示的情形类似，该软件包中也包含3个主要的数据库：(1)材料数据库；(2)机电数据库；(3)制造工艺数据库。这个CAD软件包提供的材料选择包括以下几种不同的类别：

1. 衬底材料：单晶硅，多晶硅，砷化镓，石英，蓝宝石，氧化铝，其他掺杂的半导体材料；
2. 互连和掩模材料：铝，金，银，铬，二氧化硅；
3. 其他衬底和绝缘材料：二氧化硅，氮化硅；
4. 各种光刻胶材料。

图 10.30 是一个梳齿驱动微夹钳的整体尺寸平面图，其不同电极之间的详细排列如图 10.31 所示。

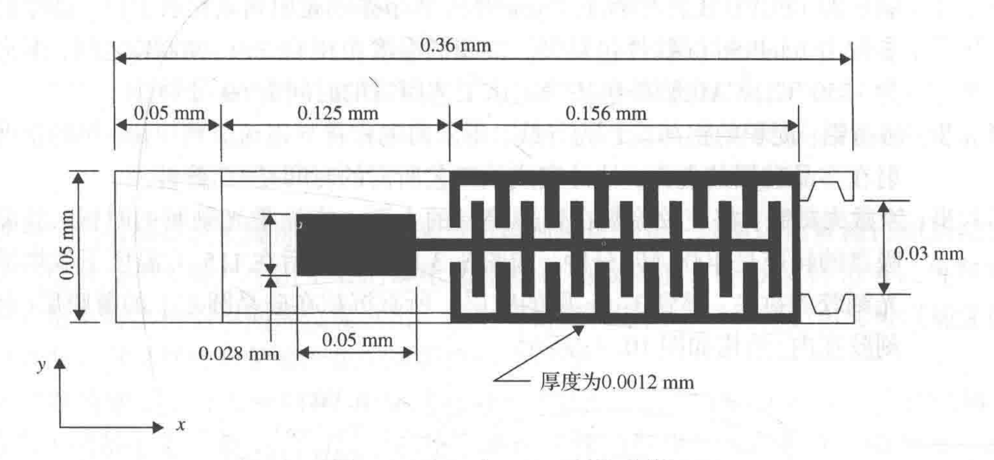


图 10.30　一个 MEMS 细胞夹钳

下面的设计案例展示了设计过程中的各个步骤。这个设计是一个学生实习的项目，因此设计人员没有下功夫去优化这个细胞夹钳的制造成本和加工时间，在一块晶圆片上只设计了一个供生产的微夹钳。实际上，人们在一块晶圆片上当然会尽量获得 MEMS 元件的最大产量。

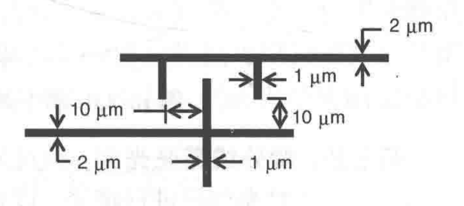


图 10.31　MEMS 细胞夹钳上不同电极之间的间隙

在这个设计案例中所采取的策略就是通过氧化、淀积和溅射等工艺在衬底晶圆片上构建出所有需要的层结构，这些层结构对电气绝缘、夹钳结构和电连接器等都是必不可少的，然后采用以腐蚀工艺为主的体硅微制造技术来去除不需要的材料并最终形成所需要的夹钳结构。IntelliSuite 软件包能够提供完成每一步工艺之后衬底的实体模型，并预估出完成每一步工艺所需的时间。这个实体模型还可以用于机电分析，以评估微结构的可靠性。

我们把这个设计案例中所包含的主要工艺步骤概述如下：

第一步：**衬底的选择**：选择硅晶圆片作为微夹钳的衬底材料。硅晶圆片是标准的直径 100 mm、厚度 500 μm 的单晶硅材料，它是由第 7 章中介绍的切克劳斯基方法制备的。硅片的表面垂直于 <100> 晶向，如图 10.32 所示。

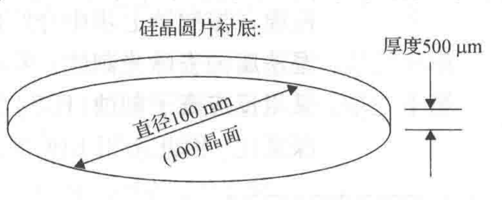


图 10.32　制造微夹钳的硅晶圆片

第二步：**衬底的清洗**：设计者选择 Pirahna 溶液来清洗晶圆片表面，这是 CAD 软件包提供的几个选择之一，这种溶液包含 75% 的硫酸（H_2SO_4）和

25% 的过氧化氢(H_2O_2)。衬底在该溶剂中清洗 10 分钟，清洗后的硅晶圆片就可以进行表面热氧化处理了。

第三步：**CVD 淀积 SiO_2 层**：在硅晶圆片的表面淀积 1 μm 厚的 SiO_2 层，作为细胞夹钳中静电致动器阴极和阳极之间的电气绝缘层。根据 CAD 软件包的指示，淀积工艺在一个温度为 1100 ℃、压力为 101 kPa 的加热炉中进行。

第四步：**LPCVD 淀积多晶硅结构层**：选择多晶硅来作为细胞夹钳的结构材料。在适中温度的 LPCVD 工艺中将 1.2 μm 厚的多晶硅层淀积到氧化层上面，详细的工艺参数由 IntelliSuite 软件包提供。淀积的温度范围在 500 ~ 900℃之间，退火温度为 1050 ℃。CAD 软件包还确定该工艺所需的时间为 60 分钟。

第五步：**溅射铝**：淀积的铝薄膜作为导线，用来向电极传导电流。将 3 μm 厚的铝薄膜溅射在多晶硅层的上面，估计完成该工艺所需的时间是 10 分钟。

第六步：**涂敷光刻胶**：将正胶涂敷在铝薄膜层的上面。在涂敷光刻胶的时候，硅晶圆片吸盘的转速是 4000 转/分钟，如图 8.3 所示。然后在 115 ℃温度下烘烤涂敷了光刻胶的衬底，得到 3 μm 厚的胶层。所有沉积在硅晶圆片上的薄膜层(包括光刻胶在内)结构如图 10.33 所示。

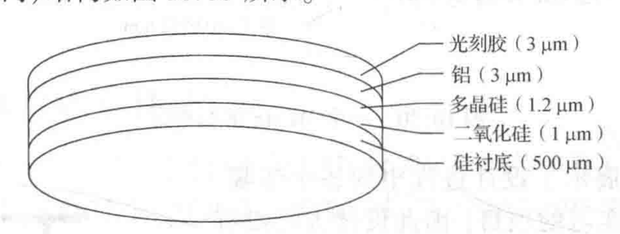


图 10.33　制作微夹钳的硅衬底表面淀积的薄膜层结构

第七步：**紫外线曝光光刻**：透过光刻掩模使用功率为 250 W、波长 $\lambda = 436$ nm 的紫外光对光刻胶进行曝光，以形成制备阳极和阴极的图形。此案例中的曝光时间是 10 s。光刻掩模板由 CAD 软件包提供。

第八步：**湿法腐蚀去除光刻胶**：采用第 8 章中介绍的氢氧化钾(KOH)溶液来腐蚀去除已曝光的光刻胶，而未曝光的光刻胶则仍然粘附在铝薄膜层表面。

第九步：**铝的湿法腐蚀**：选用特殊的腐蚀液将表面未受光刻胶保护部分的铝薄膜去除掉。该腐蚀液包含 75% 的硫酸(H_2SO_4)、20% 的($C_2H_4O_2$)和 5% 的硝酸(HNO_3)，要去除的铝层的厚度是 3 μm，估计工艺时间为 15 分钟。

第十步：**利用湿法腐蚀将铝表面的光刻胶去除**：再一次使用氢氧化钾(KOH)溶液来去除铝薄膜构成的阳极和阴极表面的光刻胶。

第十一步：**涂敷光刻胶并光刻出夹钳结构**：和第六步的过程一样，首先将正胶涂敷在整个硅晶圆片的表面，然后采用带有图 10.30 所示夹钳结构图形的另一个光刻掩模并按照第七步中介绍的相同步骤进行光刻。

第十二步：**湿法腐蚀去除光刻胶**：采用与第八步[①]完全相同的工艺步骤。

第十三步：**采用反应离子刻蚀(RIE)工艺刻蚀多晶硅**：由于夹钳结构具有相对比较高的深宽比，因此选用 RIE 工艺来去除未受光刻胶保护区域的多晶硅层，以形成

① 原文为第十步，有误。——译者注

网状的夹钳结构。该工艺所用的化学反应物中含有氯或氟的等离子体。

第十四步：**去除二氧化硅牺牲层**：该工艺将湿法腐蚀工艺与激光光化学腐蚀工艺结合起来使用，其中后者的腐蚀工艺采用 SiH_4 作为腐蚀剂和强度为 0.3 J/cm^2 的 KrF 激光。这种组合的腐蚀速率可达 40 Å/s。这一步工艺可以从二氧化硅层上释放出夹钳臂和夹钳尖头。

第十五步：**夹钳和衬底的分离**：第十四步形成的网状结构就是图 10.30 所示的夹钳结构，它通过二氧化硅薄膜粘附在同样图形结构的硅衬底表面。从衬底上分离出夹钳结构需要去除它们之间的二氧化硅层(即牺牲层)，这可以通过使用薄的金刚石锯或者使用文献[Kim 等人，1991]中描述的"腐蚀坑"技术来实现。

第十六步：**机电分析**：这一分析的目的是评估利用上述工艺流程制造出的夹钳是否能够执行预期的功能。

首先在铝引线端点上施加输入电压来进行电荷密度分析，以便评估其梳齿驱动结构上建立的最高电荷是否能够产生出足够的静电力来执行夹取功能。CAD 软件包可以按照彩色编码的方式给夹钳结构的不同部位提供出一幅电荷密度分布图。工程师们由此可以确保梳齿上的静电电荷具有足够的数量来产生出所需要的夹持力。

完成电荷密度分析之后，接下来要进行有限元强度分析，以便确保：(1)夹钳结构在 x、y 或 z 方向上的最大应力都不会超限。在这个案例中使用的坐标系如图 10.30 所示，其中的 z 坐标轴垂直于 x-y 平面。这些应力和式(4.71)中的 von Mises 应力必须保持低于材料的屈服强度。(2)形变诱生的结构畸变不能大到足以影响了梳齿驱动的致动功能。机械作用和静电作用对于致动的相互耦合效应已经在例题 10.1 中有所展示。CAD 软件包可以为所需的分析提供自动的有限元网格生成，并将分析结果通过彩色编码的形式表示在夹钳结构的实体模型上。

采用 IntelliSuite 软件包生成的细胞夹钳的实体模型如图 10.34 所示。

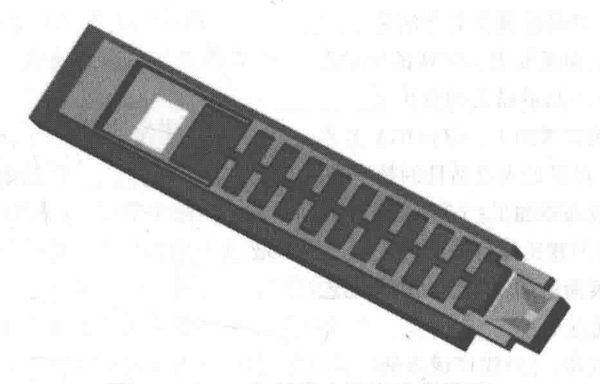


图 10.34　一个细胞夹钳的实体模型

本章习题

第一部分：多项选择

1. 微系统设计和宏观尺度常规产品设计之间的一个主要区别在于微系统的设计要求________。
   (1)设计和制造的集成；(2)设计和市场的集成；(3)化学和机械力的集成

2. 微系统部件是利用________制造出来的。
(1)精密机床；(2)物理-化学工艺；(3)微型机床
3. 微系统的设计涉及到________。
(1)单一的设计分析任务；(2)两个任务的耦合；(3)三个任务的耦合
4. 工艺流程是微系统________的一部分。
(1)设计；(2)制造；(3)生产
5. 缩短微系统设计周期的一个有效方法是________。
(1)动用更多的工程师；(2)使用更好的设计方法；(3)使用计算机辅助设计
6. 微系统的一个关键设计考虑是TTM，它表示________。
(1)时间总量管理；(2)进入市场时间；(3)目标时间管理
7. 与环境条件相关的3个关键设计考虑是________。
(1)热、机械和化学；(2)电、机械和化学；(3)电、机械和材料
8. 在微系统中使用的衬底材料有________类。
(1)1；(2)2；(3)3
9. 最常用的衬底材料是________。
(1)硅；(2)砷化镓；(3)石英
10. 最适合制作微光学元件的材料是________。
(1)硅；(2)砷化镓；(3)石英
11. 对于微部件来说，尺寸稳定性最好的材料是________。
(1)硅；(2)砷化镓；(3)石英
12. 最廉价的热绝缘和电绝缘材料是________。
(1)二氧化硅；(2)氮化硅；(3)碳化硅
13. 对微系统而言，化学稳定性最好的材料是________。
(1)二氧化硅；(2)氮化硅；(3)碳化硅
14. 对于深刻蚀工艺的掩蔽层来说，最合适的材料是________。
(1)二氧化硅；(2)氮化硅；(3)碳化硅
15. 一般而言，生产MEMS产品最廉价的方法是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
16. 一般而言，生产MEMS产品最昂贵的方法是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
17. 一般而言，在微制造中提供最大灵活性的技术是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
18. 一般而言，能够提供高深宽比几何结构的微制造技术是________。
(1)体硅微制造；(2)表面微加工；(3)LIGA工艺
19. 使用压敏电阻的主要优点是________。
(1)尺寸小；(2)灵敏度高；(3)生产成本低
20. 压敏电阻转换器最严重的缺点是________。
(1)成本高；(2)响应速度慢；(3)灵敏度对温度的依赖性强
21. 压电转换器的主要优点是________。
(1)响应速度快；(2)生产成本低；(3)灵敏度高
22. 压电转换器的一个严重缺点是________。
(1)成本高；(2)易发生脆性断裂；(3)灵敏度对温度的依赖性强
23. 电容式转换器的主要优点是________。
(1)适合于高温应用；(2)简单；(3)生产成本低

24. 电容式转换器的一个严重缺点是________。
(1)体积大；(2)非线性的输入/输出关系；(3)灵敏度低
25. 谐振式转换器具有________的优点。
(1)简单；(2)可靠；(3)高灵敏度和高精度
26. 谐振式转换器的一个严重缺点是________。
(1)加工复杂；(2)灵敏度对温度的依赖性强；(3)输入/输出可靠性差
27. 使用电阻加热致动存在的问题是________的控制。
(1)温度；(2)热源；(3)加热速率和制冷速率
28. SMA的意思是________。
(1)智能材料致动器；(2)形状记忆合金；(3)形状记忆致动器
29. 在微系统设计的初期阶段就必须考虑其封装，以便确保________。
(1)封装的低成本；(2)用户的高需求；(3)合格的产品外观
30. 光刻的意思是________。
(1)给微系统拍照片；(2)产生微系统几何结构的图形；(3)在微系统产品上制作标签
31. 在微系统设计的初期阶段，薄膜淀积工艺的选取是非常重要的，因为这些工艺是________。
(1)昂贵的；(2)细致的；(3)有可能导致微系统的性能出现相反的结果
32. 对间距很小的微结构部件，引起大多数问题的力是________。
(1)热力；(2)静电力；(3)范德华力
33. 微结构中的固有应力是________导致的。
(1)微加工工艺；(2)外加的负载；(3)热力学效应
34. 在微系统中，共振现象________。
(1)应该尽量避免；(2)对某些微器件来说是必需的；(3)是没有关系的，因为它在微系统中从来不会出现
35. 对于涉及到________的微系统来说，界面间断裂是其设计中要重点考虑的问题。
(1)通过薄膜淀积形成不同材料层；(2)高温环境；(3)有断裂的微结构
36. 对于微系统的分析来说，有限元方法是一个________工具。
(1)万能的；(2)可行的；(3)无关的分析
37. 根据一般的经验法则，为宏观结构开发的商业化有限元程序可以应用在尺寸大于________的微观结构上。
(1)0.1 μm；(2)1 μm；(3)100 μm
38. 有限元分析中的插值函数与________有关。
(1)单元及对应节点的数量；(2)整个结构中的单元数量；(3)整个结构中的节点数量
39. 在有限元分析中用于推导单元方程的伽辽金方法需要________。
(1)单元的几何结构；(2)控制微分方程；(3)离散化连续介质的势能
40. 在有限元分析中用于推导单元方程的瑞利-里茨方法需要________。
(1)单元的几何结构；(2)控制微分方程；(3)离散化连续介质的势能
41. 在有限元分析中，“新生”单元或“加”单元通常被用来模拟仿真微制造技术中的________工艺。
(1)腐蚀；(2)淀积；(3)模压
42. 在有限元分析中，“消亡”单元或“减”单元通常被用来模拟仿真微制造技术中的________工艺。
(1)腐蚀；(2)淀积；(3)模压
43. 在设计微型压力传感器芯片时，一个关键的设计考虑是________。
(1)芯片的隔离；(2)机械强度；(3)污染
44. 在微型压力传感器中，可以通过________来获得更好的芯片隔离。
(1)更薄的结构；(2)涂敷保护材料进行钝化；(3)柔性的芯片粘附

45. 压力传感器中芯片的钝化是通过________来实现的。
    (1)塑料密封;(2)覆盖保护材料;(3)保持受压媒介远离芯片
46. 要使压力传感器获得最大的灵敏度，我们应该使薄膜的________达到最大。
    (1)应力;(2)应变;(3)形变
47. 在压力传感器芯片的薄膜上引入凸台是为了给薄膜提供________。
    (1)额外的刚度;(2)更好的外观;(3)均匀的应力分布
48. 在包括压力传感器在内的各种传感器设计中，输出信号的________是设计工程师主要关心的问题。
    (1)幅度;(2)线性度;(3)快速响应
49. 芯片上的毛细管电泳(CE)现象主要应用于________。
    (1)微流体致动器;(2)微压力测量;(3)生物医学分析
50. 使用芯片上毛细管电泳的主要优点是其________。
    (1)能够提供廉价的生物医学分析方法;(2)只需使用微量样本且能够快速响应;(3)是一种易于使用的分析方法
51. 典型的毛细管电泳涉及________网络。
    (1)毛细管和微管道;(2)毛细管和微型阀;(3)毛细管和微型泵
52. 毛细管电泳中的流体流动是通过________来驱动的。
    (1)导管上施加的表面力;(2)施加的容积泵送力;(3)外加的电场
53. 毛细管电泳网络包含的两个主要部分是________。
    (1)注样管道和分离管道;(2)注样管道和样品流动管道;(3)样品分离管道
54. 对流是一种物理现象，它涉及到运动物质________的改变。
    (1)压力;(2)温度;(3)运动中相位
55. 毛细管电泳的设计分析需要________之间的耦合。
    (1)对流和扩散;(2)对流和电迁移;(3)对流、扩散和电迁移
56. 在毛细管电泳时，生物样品中不同成分的分离是由于其________的差异。
    (1)密度;(2)浮力;(3)不同成分电渗淌度
57. 在微系统设计中，使用计算机辅助设计的主要目的是________。
    (1)使得设计更加漂亮;(2)使得它更为精确;(3)缩短设计流程所需要的时间
58. 用于微系统的现代CAD软件需要实现________之间的集成。
    (1)设计和分析数据库以及设计原型;(2)设计、材料和分析数据库;(3)设计、材料和工艺制造数据库
59. 用于微系统设计的CAD软件中的设计数据库一般包含________。
    (1)机械和电子设计分析;(2)机械和化学分析;(3)电子和化学分析
60. 在微系统设计中使用CAD软件的一个主要优点是能够实现________。
    (1)结果的图形表现;(2)器件的动画;(3)结果的快速获取

第二部分：描述题

1. 在微结构中诱发的固有应力的主要来源是什么?
2. 为什么模态分析在涉及到运动的微系统设计中是非常重要的?
3. 对于一个截面如图10.16所示的微型压力传感器芯片来说，试评估其灵活性的改善情况。假设芯片的总体尺寸保持不变，即边长A和支撑脚c保持不变，如果芯片的高度H增加一倍，当薄膜片承受相同的外加压力时，其引起的薄膜最大弯曲应力和最大形变量分别是多少?
4. 假设微管道的截面形状分别是(a)菱形、(b)跑道形和(c)梯形，且其水力学直径与例题10.2中相同，为30 μm，试求出水在该微管道中的流动阻力。将所求出的3种截面以及例题10.2中给出的3种情况的水流动阻力制成一个表。
5. 重新构造出反映毛细管电泳网络的式(10.18)~式(10.22)，各种条件与图10.23所示类似，只是两个管道之间呈45°夹角。

第11章　微系统的组装、封装与测试

11.1　引言

大多数的MEMS和微系统中都包含有一些尺寸在微米级的精细部件。这些部件在组装成相关的产品之后，如果没有得到良好的封装并经过可靠性的测试，就很容易出现各种故障或导致结构损坏。由于微系统的封装技术远没有达到微电子集成电路封装技术那样的成熟程度，因此如何对这些器件和系统进行可靠的封装就是微系统产业面临的一个主要挑战。从广义上说，微系统封装包含3个方面的主要任务，即组装、封装和测试，在一份特殊的报告[National Research Council，1997]中它被缩写为AP&T(assembly，packaging，and testing)。事实上我们从图11.1中也将看到，对于如图2.9和图4.6所示的用作微型压力传感器的硅芯片的生产过程来说，其中很大一部分都会涉及到组装(例如其中的步骤6、步骤7和步骤12等)、封装(例如其中的步骤3~步骤5，以及步骤9、步骤10、步骤13和步骤16等)和测试(例如其中的步骤2、步骤8、步骤11、步骤14和步骤15等)。

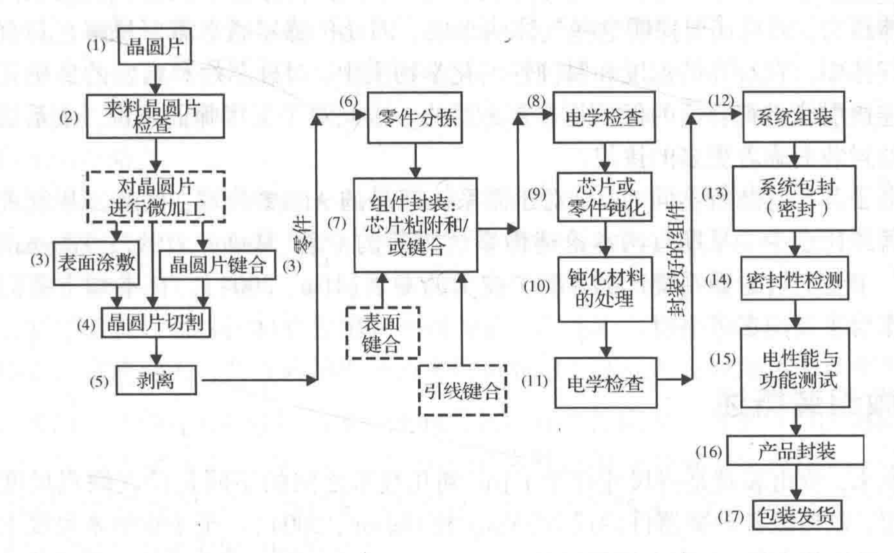


图11.1　微型压力传感器芯片的生产工艺流程(引自[Hsu和Custer，2004])

因此MEMS产品的AP&T成本占据了其全部生产成本的很大一部分是一点也不令人奇怪的。例如，对于采用塑料进行钝化保护的普通微型压力传感器来说，AP&T占其总生产成本的20%左右，而对于应用在高温和有毒媒介中的特种压力传感器来说，AP&T则可能要占其总成本的95%以上。对于各种不同的MEMS和微系统来说，其AP&T成本随着产品的不同而有所不同，目前，这一成本平均约占总成本的70%左右。一个更为严重的问题在于：AP&T通常是导致大多数微系统出现失效等故障的主要原因，因此在MEMS和微系统产品的设计和开发中，AP&T技术是一个需要引起关注的关键因素。

微系统生产中的AP&T成本较高主要归因于该产业中缺少已经开发和建立起来的各种标

准。在大多数微系统产品中，AP&T工艺都是基于客户的需求来进行的。各个生产企业出于保护自己专有技术的考虑，一般也不愿意与其他企业分享其生产知识和经验。在微电子产业中已经实现的AP&T工艺的标准化也一定能够大大降低微系统产品的生产成本，但是这样的标准化与现实之间显然还有很遥远的距离，如图11.2所示。

微系统产品AP&T成本较高的另一个原因与微系统制造过程中所用到的一些特殊的工艺技术有关。在微系统制造技术领域由于缺少足够的研究和开发投入，不仅导致其生产成本较高，而且也降低了微系统和MEMS产品小型化的价值，这一点我们在1.6节中已经提到，因为大多数这类产品在完成了封装之后都是处于介观尺度。

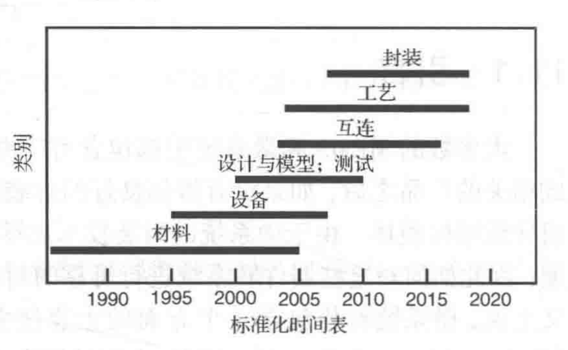


图11.2　微制造技术实现标准化的时间表[Walsh等人,2002]

一个众所周知的事实是，对于集成电路来说，封装的主要目的只是为了保护硅芯片以及与之相连的引线不受环境因素的影响，而微系统的封装则不仅期望保护这些精密元件(例如硅芯片)不至于受到恶劣环境的影响，而且还要使得这些芯片能够同时探测外部环境。例如，微型传感器不仅需要检测从内燃机中排放出的气体压力，而且还要探明这些气体的组成。因此传感器通常需要暴露在具有较高温度的腐蚀性气体中。在过高的温度和腐蚀性的化学物质中，对硅芯片和精密的传感元件以及相互之间的连接引线进行合适的保护是非常必要的。因此对于工程师们来说，微系统的封装要比微电子的封装面临着更多的挑战。

和微电子芯片封装所不同的是，对于微系统产品的AP&T技术，目前公开发表的综合性论述和专著还比较少。早期有两本论述微系统封装的专著[Madou, 1997; Tummala, 2001]，近期也有一本专门讨论微系统产品AP&T技术的专著[Hsu, 2004]。在本章中我们将使用最后一本书作为主要的参考书目。

11.2　微组装概述

一般说来，微组装就是将尺寸介于1 μm到几毫米之间的不同元件在微观尺度上键合或连接在一起，以构成各种微器件的过程[Yang和Nelson, 2004]。至于在纳米尺度上组装各种不同元件，我们将在第12章中详细讨论。

微系统的组装过程主要就是高精度地拾取和放置各种元件，以便生产出各种三维的微结构。表11.1列出了NEXUS发布的1996年~2002年已经生产的微系统产品的数量以及MEMS与微系统产业的年收入额，其中的成熟产品包括硬盘读写头和喷墨打印头等产品，而新兴产品则包括自动给药系统、光学开关以及片上实验室等产品。表中最右侧两列的数据是根据1996~2002年的数据线性外推得到的。因此我们估计2006年组装的微系统数量已达到120亿只，其中包括大约20亿只的硬盘读写头和喷墨打印头，这些产品的自动化组装程度比较高，另外还有接近100亿只产品是通过半自动的工艺甚至手工方式完成组装的，而这种手工的组装方式显然是极其昂贵、枯燥烦人和耗费时间的。这样形成的产品往往在精度上很难满足非常严格的要求，更不用说满足必要的产品质量和可靠性指标要求了。

表 11.1　微系统产品的生产数量

微系统产品	1996	1996	2002	2002	2006	2006
	数量(百万)	收入(百万美元)	数量(百万)	收入(百万美元)	数量(百万)	收入(百万美元)
成熟产品	1595	13 033	6807	34 290	10 282	48 461
新兴产品	33	107	1045	4205	1720	6937
总量	1628	13 140	7852	38 495	12 002	55 398

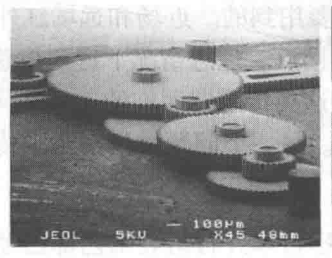
资料来源：NEXUS，http://www.wtec.org/loyala/mcc/mes.eu/pages/chapter-6.html。

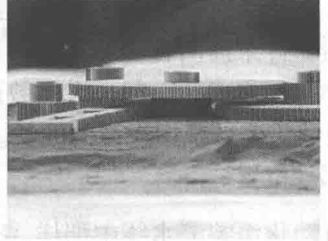
11.3　微组装的高成本

表 11.1 所列出的大批量微系统产品的组装和封装工作在产品的可靠性和制造成本方面给工程师们提出了一些很严峻的技术挑战。造成微组装成本较高的原因有很多，下面给出几条比较明显的原因：

1. 微组装目前还缺少一些标准的流程和成熟的准则。通常是根据个别客户的要求或者设计工程师的个人经验，开发出相应的工艺流程来进行产品的组装。
2. 微组装目前还缺少有效的工具。类似像微夹钳、机械手以及机器人这样的工具目前还处在研究开发阶段。微组装还需要用到各种可靠的视觉对准设备，例如各种专门为微系统组装技术而设计的立体电子显微镜和电子束、紫外线以及离子束成像系统。
3. 在微系统部件的插入和组装过程中目前还缺乏一套成熟的方法来设定合适的容差。在 11.4 节中将会介绍微系统组装过程中存在多种不同的工艺和技术容差。对于微组装来说，目前尚未正确认识并有效建立一套设定零件进料以及抓取和固定相关匹配表面等容差的策略。
4. 微小元件的组装主要是通过一些物理/化学工艺过程来实现的，这些工艺都是与材料密切相关的。传统的组装方法是不适用于各类微器件的，因为这些待组装的微小元件尺寸都非常小，而且其尺寸之间的容差也在亚微米的尺度。另外，与宏观尺度组装技术主要考虑重力和各种物理作用力不同的是，微组装主要考虑的是化学作用力和静电作用力。目前尚无一些成熟的理论或方法来应对上述这些与微组装密切相关的问题。

缺少有效的工具和组装策略导致微系统的组装过程往往需要耗费相当长的时间。图 11.3 展示的是在美国桑迪亚国家实验室里通过手工组装形成的一个微型齿轮组[Feddema 等人，1999]。大家可以充分设想一下，即使是一个受过良好训练的熟练高手，要手工完成这些微小零部件的组装也是需要消耗大量时间的。





压合齿轮传动：
工具钢量柱直径>0.0059 in
铝衬底
镍齿轮组

图 11.3　一个手工组装的齿轮组(经桑迪亚国家实验室许可使用)

11.4 微组装工艺过程

尽管微组装技术与传统的组装技术在使用的方法和工具方面都存在着很大的差别，但是它们所包含的主要步骤则是非常类似的。

1. **零件的馈送技术**：在微电子器件组装领域普遍使用的一些零件馈送技术，例如编带式元件馈送技术，也可以应用于微型零部件的组装技术中。
2. **零件的抓取技术**：微夹钳、操作臂以及机器人是可以用来完成这类任务的理想工具，但是这些工具由于没有智能化的终端传感器都不能正确地处理微小的零部件。智能化的终端传感器要求将抓取动作的定位、感知和走向集成在一起，某些配件之间的精密对准就会对这些功能提出要求。从微夹钳上释放出这些微小零部件也存在一些很关键的问题，详细情况将在 11.5.3 节中介绍。
3. **零件的相互配接技术**：正如前面所指出的那样，在微米尺度上，静电力和化学力对于微夹钳与零件之间以及配对零件之间的相互作用具有主要的支配作用。有必要采用某些特殊的夹钳设计方法以便能够在可能的静摩擦力作用下释放掉上述静电力和化学力，从而使零件易于从夹钳上脱离，同时也易于实现微小零件之间的相互配接。我们在 11.5.2 节和 11.5.3 节中将给出对于上述这些问题可能的解决方案。
4. **零件的键合和紧固技术**：正如在 11.14 节中将要介绍的，有多种不同的键合技术可供使用。绝大多数这类键合技术都会涉及到微制造工艺。采用具有批量加工特点的键合技术将零件连接在一起有可能实现各种零件的自动化组装。其他能够将各种不同零件连接在一起的方法还包括脉冲激光淀积技术、焊接技术以及基于表面化学和薄膜化学的卡扣装接技术，这些技术都可以用来紧固微小的零部件。
5. **密封与钝化技术**：一旦完成了各种零部件的布局和连接之后，就必须对这些精细的元器件进行密封处理。11.16 节和 11.20 节(带有凝胶的硅芯片)将要介绍的微型压力传感器中对于精密硅芯片的保护就是一个关于密封处理的实例。一旦所有的零部件都被组装、连接并密封之后，就要采用塑料或金属外壳将这些元器件钝化保护起来。密封保护好的微器件的典型外形分别是如图 1.2 所示的微型压力传感器和如图 1.8 所示的微型加速度计。
6. **感知与验证技术**：诸如立体显微镜这样的三维机器视觉系统对于各种零部件的视觉验证以及零部件之间的对准是非常有效的。其他类型的微型传感器，例如触觉传感器和热敏元件，也是微组装和检查工作中需要用到的。近场和远场红外(IR)传感器可以用作微型热反馈器件来监测各种不同的焊接点。理想情况下这些传感器应该与微夹钳以及其他的操作工具集成在一起。大多数这类传感器面临的一个共同的问题就是其景深较短，接近光学传感系统中光源的波长。另一个问题就是都要求传感器的探头接近需要感知的零部件位置。

正如在传统的自动化组装流水线中那样，串行和并行组装工艺都已经应用在微装配工艺线中。串行微组装要求使用各种微型的操作工具和传感反馈系统，在任意时刻只能组装一个或少数几个零部件。而并行微组装则既可以是确定性的，也可以是随机性的[Madou, 2002]。在并行微组装过程中，很多零部件是采用各种分布式的物理方法同时组装起来的，包括静电

力、毛细管作用力、离心力、机械振荡以及流体的动态作用力等[Yang 和 Nelson, 2004]。并行微组装对于微系统产品的大批量生产是非常具有吸引力的。这类并行微组装的一种情形就是某个微系统产品中一些特定元件集合的自组装技术，其中一个实例就是关于自定向流体输运(SOFT)技术的研究报告[Smith, 1999]，它能够在每分钟内以 ±1 μm 的定位精度完成上百万个微小物体的位置摆放。这种组装技术的工作原理涉及到利用微加工技术制备出截面形状为梯形的微小物体并将其保持在某种混合浆液中，然后在目标衬底上再通过微加工技术制备出与之相匹配的凹槽，最后微小物体与凹槽之间以很高的精度通过随机组合的方式实现组装。微小物体的尺寸可以小至 30 μm。这种组装技术能够以很高的生产率实现相互匹配零部件之间的自组装。

美国桑迪亚国家实验室就开发过一种并行组装的工作单元[Feddema 等人, 1999]。设计该工作单元的初衷是想用来组装那些由较大深宽比的零部件所构成的微器件，该工作单元包含一个带有微夹钳的笛卡儿机械手、一个可视化的伺服系统和一个微组装规划装置。

采用笛卡儿机械手分别将直径为 385 μm 和 485 μm 的引脚按压到衬底上(如图 11.4 所示)，然后将一个直径为 3 in 的硅晶圆片放置到上述引脚上，该晶圆片边缘带有采用 LIGA 工艺制备出的齿轮。采用上视或下视的显微镜来确定衬底上孔的位置、需要按压到孔中的引脚位置以及需要放置到引脚上的齿轮位置。这个可视化系统对于零部件的定位精度可以达到 3 μm，而机械手对与零部件的放置精度可以达到 0.4 μm。

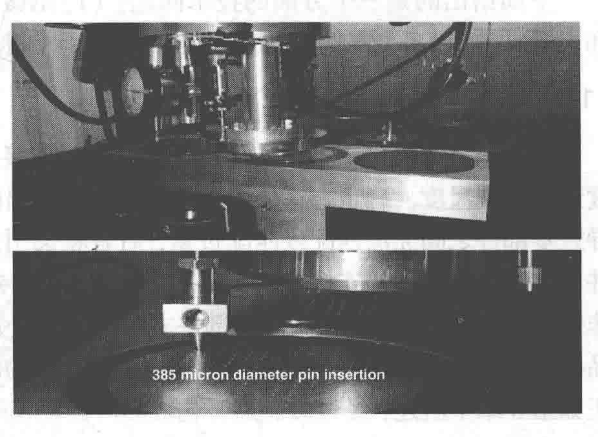


图 11.4　LIGA 零部件的并行组装(经桑迪亚国家实验室许可使用)

表 11.2 给出了有关串行微组装技术和随机并行微组装技术的对比，它可以帮助工程师们在开发自动化的微组装系统时做出切实可行的决策。

表 11.2　串行和随机并行微组装技术的对比

	串行微组装	随机并行微组装
允许零部件的复杂度	高	低
组装工具	微型操作工具和微夹钳	采用诸如静电力这样的分布式操作方法
传感反馈需求	显微观察与微作用力	最低要求
为使损伤最小化所采取的相互作用力控制	直接，可实现精确控制	间接，难以精确控制
涉及到 3D 操作与组装的工艺灵活性	高	低
不同零部件之间相对位置精度的要求	可以通过传感系统进行补偿	无法进行补偿
工艺效率	低至中等	高
错误更正	可能	困难
组装系统复杂度	高	低
组装系统成本	高	低

资料来源：[Yang 和 Nelson, 2004]。

11.5　微组装中主要的技术问题

微组装工艺中还存在一些主要的技术问题。这些问题中多数都与精密机械工程有关，另外一些问题则主要与人的因素有关，也就是与操作者有关[Van Brussel 等人，2000]。无论是完全自动化的微组装，还是机器辅助的人工微组装，都要求操作者使用一些特殊的工具，例如终端带有特殊感知器的镊子，它可以在高倍数显微镜下完成简单的夹取/摆放操作。由于所使用的操作工具在体积上通常都要比待夹取的零部件大好几个数量级，因此在精细的微组装操作中所特别需要的手眼之间的协调性却往往被丢失了。鉴于需要使用高倍数的显微镜才能完成微组装的过程，这就不可避免地导致了显微镜的物镜与进行微组装的衬底之间的工作距离较短。此外，使用高倍数的显微镜来放大微组装的零部件还会大大减小观察视场的面积，由此导致操作者无法对其工作区域内所组装的各种零部件有一个全局的概览。

下面给出的是三个方面的技术问题：(1)给微组装设定合适的容差；(2)研发合适的设备和夹具；(3)设备、零件运动及夹持力的精密控制。

11.5.1　微组装的容差

要完成各类器件中不同零部件之间的相互连接，容差是必不可少的，无论其是处于宏观尺度还是微观尺度。确定合适的容差对于最终制造出的产品质量也是非常关键的。容差不足将会导致零部件之间无法匹配或匹配过紧，后者将会引起相互匹配的零部件之间产生过大的应力，并导致零部件之间的连接提前失效。另一方面，容差过大也会导致不同零部件之间的匹配变得非常松散或迟缓，这也会引起零部件之间配合不良并使得产品质量变差。在 MEMS 和微系统产品的组装过程中确定合适的容差是一个至关重要的问题，因为其中的零部件尺寸非常小，而且正如第 8 章中所述，经过微制造工艺之后对这些零部件的表面形貌也缺乏有效的控制。

在微组装过程中通常会涉及到 3 种容差[Hsu 和 Custer，2004]：(1)尺寸容差；(2)几何容差；(3)对准容差。

尺寸容差：尺寸容差是与所设计加工的零部件尺寸紧密相关的。设计工程师确定这样的容差并将它们应用于所要组装的各个零部件的尺寸中。在宏观尺度的加工制造中，通常都是将尺寸容差确定为工件总体尺寸的 1%。然而这个准则对于 MEMS 和微系统来说却是不太符合实际情况的，因为微系统中大部分零部件的尺寸都是在微米量级。对于大多数微系统中的零部件来说，将尺寸容差设定为总体尺寸的 1%，也就是在纳米量级，这么小的尺寸容差将是没有多少实际意义的，因为大多数通过微加工方法制造出的零部件的表面粗糙度都已经超出了这个尺度的范围。因此对于工业界来说，给这些微小的零部件设置合适的尺寸容差就成了一件非常具有挑战性的工作。在这个领域还需要做大量的研究工作，因为这些尺寸容差将会显著影响很多 MEMS 和微系统产品的质量和性能，同时也会影响它们的可靠性。一般的文献中很少有讨论微系统尺寸容差的信息，表 11.3 中列出了有限的 3 种微制造工艺中几种不同材料的典型尺寸容差。

表 11.3　几种典型微制造工艺中的尺寸容差

制造工艺	材料	最小/最大尺寸	尺寸容差(μm)
湿法各向异性腐蚀	硅、砷化镓、石英、碳化硅、磷化铟	几个微米/最大晶圆片尺寸	1.0
干法刻蚀	硅、砷化镓、石英、碳化硅、磷化铟	亚微米/最大晶圆片尺寸	0.1
多晶硅表面微制造	多晶硅，铝，钛	亚微米/最大晶圆片尺寸	0.5

续表

制造工艺	材料	最小/最大尺寸	尺寸容差(μm)
绝缘层上硅	硅晶体	亚微米/最大晶圆片尺寸	0.1
LIGA 工艺	镍，PMMA，金，陶瓷	0.2 μm/10 cm×10 cm 或更大	0.3

资料来源：[Madou，1997]。

几何容差：设置这个容差既与微制造工艺所生产的微型零部件的几何结构偏差有关，也与微系统的具体应用领域有关。这个几何容差带来的结果也会显著地影响微系统的性能，已经有研究案例表明了这一点[Hsu 和 Custer，2004]，该研究案例中包含一个由梳状驱动器激励的谐振器，如图 11.5(a)所示。

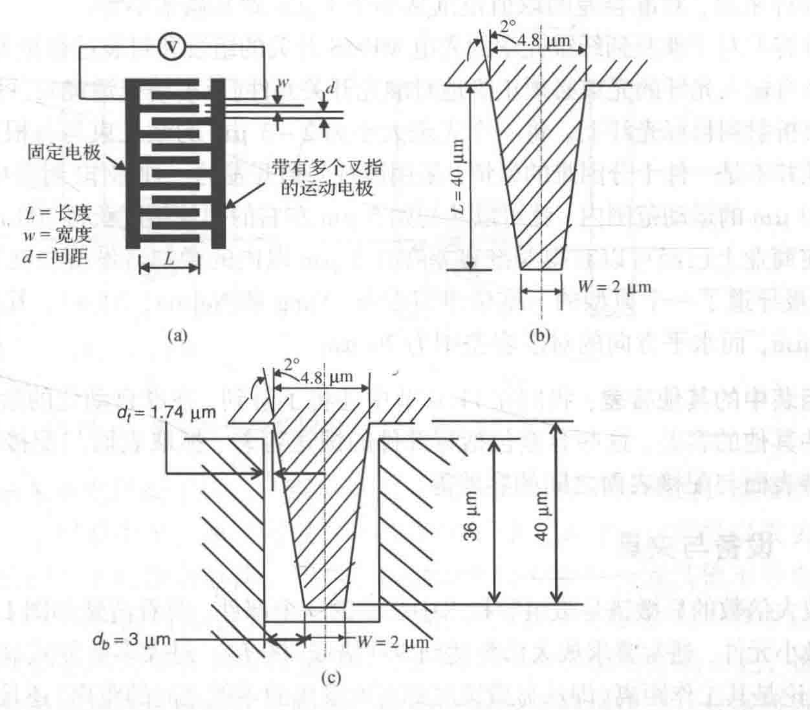


图 11.5　一个由梳状驱动器激励的谐振器中的几何容差：(a)梳状驱动器激励的谐振器；(b)具有2°边缘倾角的叉指电极；(c)电极缝隙的变化

Tang 等人指出[Tang 等人，1990]，与电极的宽度 w 以及电极的长度 L 相比，图 11.5(a)中梳状驱动器的运动电极与固定电极之间的距离 d 对于梳状驱动器的性能具有更为显著的影响。因此我们将把注意力主要集中在梳状驱动器叉指电极的几何形状和尺寸上。

我们在 9.2.5 节中已经了解到，对于具有深槽的微小零部件来说，例如上述梳状驱动器中的叉指电极，一种常用的制备方法是采用反应离子深刻蚀(DRIE)技术，该工艺能够制备出具有很高深宽比的沟槽，并且其侧壁的倾角 θ 很小($\theta = \pm 2°$)，接近陡直的状态，其放大的图如图 11.5(b)所示。

现在来考察一个梳状驱动器，如文献[Tang 等人，1990]中所述，其叉指的标称尺寸分别为长度 $L = 40$ μm、宽度 $w = 2$ μm、间距 $d = 3$ μm，如图 11.5(a)所示。假如考虑最坏情况下叉指顶端的宽度为 2 μm，由此可以预料该叉指底部的宽度将为 2 μm + 2×40 μm×tan(2°) = 4.8 μm，如图 11.5(b)所示。当相邻叉指的重叠部分长度为 36 μm 时，我们可以预料相邻叉指根部间的距离将从标称的 3 μm 缩小到 1.74 μm，如图 11.5(c)所示。由于平行板电容器的

输出电容是与相邻电极之间的距离成反比的，因此叉指电极两端输出电容的改变(以及由此导致梳状驱动器驱动力的改变)将达到 $d_b/d_t = 3/1.74 = 1.72$ 倍，或者近似为2倍，这就会带来器件性能的显著退化。

对准容差：合适的对准容差对于微组装过程中各种零部件的插入和摆放是非常必要的。目前在微组装工艺中还没有任何现成的准则可以用来确定对准容差，而且对准容差也随着微器件不同的应用领域而有所不同，例如微光学系统的对准容差就和生物 MEMS 器件的对准容差截然不同。对于图11.5所示的梳状驱动器激励的谐振器来说，我们不难看到其叉指之间的对准容差不能小于1.74 μm，只有这样才能避免相邻叉指之间发生电学短路现象。对于大多数零部件来说，对准容差的取值范围从小于1 μm到几微米不等。

对准容差对于涉及到纤维光学的光电 MEMS 开关的组装和封装过程至关重要，因为在这类器件中来自输入光纤的光束必须正确地对准光开关元件(反射镜或透镜)，只有这样才能最终将这些光束折射到目标光纤上。将一个光斑大小为2~3 μm的激光束与一根内核直径为9 μm的光纤对准并不是一件十分困难的事情，采用波音公司开发的一种称作"封装中微对准"的特殊技术，在10 μm的运动范围内，就可以从初始5 μm左右的摆放精度获得200 nm的对准容差。

目前商业上已经可以获得对准容差在0.5 μm以内的微制造设备和夹具了。Yang 和 Nelson 已经报导道了一个典型的三维微组装设备[Yang 和 Nelson，2004]，其垂直方向的对准容差为10 μm，而水平方向的对准容差则为20 μm。

微组装中的其他容差：我们在11.6节中还将了解到，在准自动化的微组装技术中还会涉及到一些其他的容差，这些容差包括零部件的馈送容差、抓取表面与配接零部件之间的容差以及夹持表面与配接表面之间的容差等。

11.5.2 设备与夹具

高放大倍数的显微镜是微组装技术中必需的一个部件，要看清楚如图1.6所示的微加速度计中的微小元件，通常要求放大倍数达到300倍或400倍。对大多数复式显微镜或变焦显微镜来说，无论是其工作距离(即从显微镜底部至所聚焦的零件之间的距离)还是其视场范围都将缩小到不足0.5 mm，这么短的工作距离给开发合适的微组装操作设备带来了一个主要的问题。

微型镊子是微组装工艺中最常用的一种工具。由于显微镜与工作零件之间的工作距离比较短，这些微型镊子的两个夹持臂通常比较长，大概在数百微米至厘米的量级，而这两个夹持臂的厚度则通常不超过100 μm。考虑到微型镊子夹持臂端点精确定位所需要的结构刚度，这种具有较大长宽比的夹持臂给机械设计也提出了一个很大的难题。

微夹钳在微组装工艺中是用来操作较大的零部件的。采用静电力驱动的微夹钳的工作原理在2.4.1节中已有介绍，其典型结构如图2.26所示。其他的驱动方法也在微夹钳中获得应用，包括液压或气压驱动[Peirs 等人，1998]、压电驱动[Breguet 等人，1997]、热驱动[Greitmann 和 Buser，1996]以及采用局部激光加热的形状记忆合金(SMA)驱动[Ikuta，1990]。这些驱动方法的工作原理都已经在2.3节中做了详细介绍。

对于微型镊子和微夹钳来说，一个非常关键的要求就是必须能够在微组装操作的过程中精确地控制抓取力。抓取力过大可能会损坏精密的零部件，而抓取力过小又可能会导致零部件滑落或由于较紧的容差而损坏与其配接的零部件。因此几乎所有的微型镊子和微夹钳上都装配了触觉传感器，并开发了利用精确传感信息的闭环反馈控制系统来控制上述抓取力。

11.5.3 微组装工具中的接触问题

在微组装工艺中一个主要的任务就是“夹取和摆放”操作。我们已经了解到可以采用微型镊子和微夹钳来完成夹取零部件的操作，然而一个更关键的问题是如何释放这些零部件。图 11.6(a)展示了利用抓取力克服物体的重力，从而夹持了一个圆柱形物体的情形。在微组装过程中，由于零部件的尺寸都非常小，因此其重力不再是一个主要的制约因素，而在夹持臂与物体之间的接触面处的微小间隙却可能诱发出一个粘附力，这在传统的“夹取和摆放”操作中是不会出现的。由于这种粘附力的存在可能会导致夹持工具夹取的零部件无法得到释放，如图 11.6(b)所示。这种独特的粘附力可能会包括：(1)静电力；(2)范德华力；(3)表面张力。

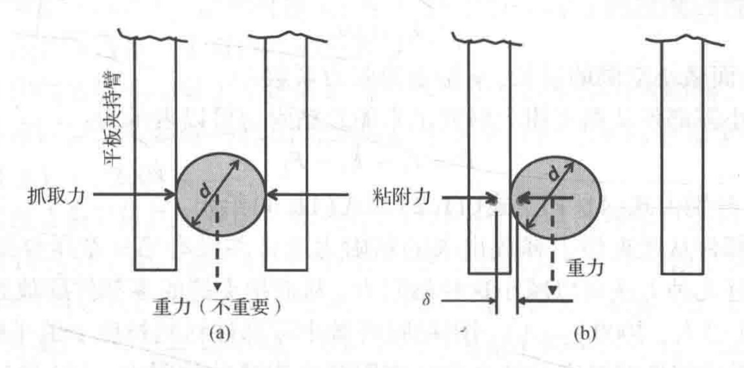


图 11.6 微组装中的抓取力：(a)抓取；(b)释放

静电力：我们在第 3 章中已经了解到，原子是由 3 种不同的粒子构成的，即带负电荷的电子、带正电荷的质子以及中子。原子可以在外部作用下发生离化，它既可以失去电子而带正电荷，也可以获得电子而带负电荷。当相互接触的两种介质材料或其他不导电材料上形成了相反的电荷时，就会因为库仑效应而产生静电力，这一点在 2.3.4 节中已有介绍。能够导致原子发生离化的外部作用可以是第 3 章和第 8 章中介绍的掺杂工艺，也可以是一种机械方法，例如将两种介质材料在一起相互摩擦。在很多种情况下，只需将两个不导电材料相互重叠摆放在一起就能够使其表面带上电荷。通过接触起电方法产生的电荷就存储在每个物体的表面，这些存储在物体表面的电荷就是导致微夹钳上产生静电吸引力的原因。

对微小物体之间产生的静电吸引力的定量表示取决于上面提到的微夹钳及所夹持的零部件的几何形状。对于如图 11.6 所示的圆球与平板的组合情况，这个静电吸引力可以表示为：

$$F_e = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon d^2} \tag{11.1}$$

式中，q 是静电荷，对于微夹钳来说，$q \approx 1.6\times10^{-6}\,\mathrm{C/m^2}$；$\varepsilon$ 是介质的介电常数，对于空气来说，$\varepsilon = 8.85\times10^{-12}\,\mathrm{C^2/N\cdot m^2}$；$d$ 是球体的直径，一般在 10 μm ~ 1 mm 之间。

范德华力：我们在 3.4 节中曾经提到，范德华力是分子键作用力的一种表现形式，这种力从本质上讲通常都是吸引力，它们存在于两个相互紧密接触的表面之间。范德华力是一种短程作用力，它随着两个接触表面之间距离的增大而急剧衰减。但是这种范德华力对于图 11.6 所示的微夹钳与微小零部件之间的粘附力也是有贡献的。直径为 d 的球体与相接

触的平板夹钳臂之间的范德华力可以表示为：

$$F_v = \eta \frac{Ad}{12\delta^2} \tag{11.2}$$

式中，A 是哈梅克常数，$A = 10^{-20} \sim 10^{-19}$ J；δ 是相互接触的两个表面上原子之间的距离，典型值为 $\delta = 4 \sim 10$ Å；η 是对接触表面粗糙度的修正因子，其值近似为 $\eta \approx 0.01$。

表面张力：我们知道在液体的毛细管流动过程中表面张力是一个主要的决定因素。如图 11.6 所示，当微夹钳夹持微小零部件的动作发生在比较潮湿的环境中时，就会出现这种以表面张力为主的粘附力。接触表面的微小空洞就会引起这种表面张力，从而产生接触面之间的粘附力。根据 5.6.1 节中对表面张力的描述，如图 11.6 所示的球体与平板夹钳臂之间的粘附力可以近似表示为[White, 1994]：

$$F_s = s\gamma \tag{11.3}$$

式中，s 是接触表面微小空洞的周长，γ 是表面张力系数。

因此阻止微小零部件从微夹钳上释放出来的总粘附力可以表示为：

$$F = F_e + F_v + F_s$$

式中，F_e、F_v、F_s 分别由式(11.1)、式(11.2)和式(11.3)给出。

阻止微小零部件从微夹钳上释放出来的粘附力通常并没有第 9 章所介绍的粘连力那么大。目前已经有好几种方法可以减小这种粘附力，从而把夹持的零部件摆放到衬底上的正确位置[Van Brussel 等人, 2000]：(1)利用粘胶将微小零部件粘到衬底上的正确位置，采用这种方法，就要依靠零部件对衬底的粘合力来克服微夹钳臂的粘附力；(2)通过喷射一股气体将张开的夹钳臂上粘附的微小零部件吹落下来；(3)在接触表面插入一根细针来释放零件；(4)采用轻微振动微夹钳臂的方式也可以将粘附的微小零部件释放下来。

11.6 微组装工作单元

目前只有少数 MEMS 和微系统产品实现了自动化的微组装，例如用于汽车防撞气囊展开系统中的惯性传感器和已经建立了市场需求并能够大批量生产的喷墨打印头，其他大多数产品还是采用诸如微型镊子和微夹钳等微组装工具进行手工组装的，或者就是采用微组装工作单元来实现准自动化组装的。开发这些工作单元的目的是为了帮助手工操作人员能够更高质量地组装和封装微系统产品。大多数微组装的工作单元都要求有一个达到 100 级的局部可移动清洁环境。前面我们在 11.4 节中已经介绍了美国桑迪亚国家实验室一个用于引脚与孔之间微组装工艺的工作单元。

图 11.7 所示就是一个典型的微组装工作单元示意图。

下面列出的是一个典型的微组装工作单元中所包含的基本组成部分。

1. **集成化的微距定位器**：一个集成化的微距定位器可以将待组装的零部件传送到组装的位置，这种微距定位器设计的线性运动分辨率为 40 nm。一个可接受的定位器能够以 300 nm 的步长沿着 x 轴和 y 轴方向做线性运动，也能够以 70 nm 的步长沿着 z 轴方向做线性运动，同时它还能够以 0.0003°的步长围绕 x 轴和 y 轴做圆周运动。
2. **显微镜光学与成像系统**：通常采用带有照相机成像系统的立体显微镜来对组装操作过程提供实时的三维可视化监测。一般希望选择工作距离长达 30 mm、视场面积较大且

分辨率高达 1 μm 的显微镜。为了避免组装过程中出现碰撞和阻塞现象，良好的照明和高分辨率的计算机视觉系统是必不可少的。

3. **微操作装置**：该装置可以包括带有专门设计的终端感知器的微夹钳或者具有较长夹持臂的微型镊子。微夹钳或微型镊子上的终端感知器装有触觉传感器和实时反馈控制系统，这些终端感知器能够克服 11.5.3 节中提到的粘附力的作用，并将加持的微小零部件释放在衬底上的正确位置处。

   某些工作单元在微组装过程中使用微型机器人来完成“夹取和摆放”的操作。由 Fatikow 开发的机器人的高度只有 50 ~ 80 mm[Fatikow, 1998]，它们安装在一个玻璃平板上，并能够在压电驱动器的作用下做三个自由度的运动(其中两个自由度是平面内的，一个自由度是旋转的)。这种机器人能够以高达 30 mm/s 的速度做线性运动，其上安装的夹钳也是可以做三个自由度的旋转运动的。

   开发微操作装置遇到的最主要挑战是缺少体积小、重量轻的致动器，这种致动器能够产生高精度的运动和足够的作用力或力矩来驱动后面连接的静态负载和终端感知器[Yang 和 Nelson, 2004]。

4. **高精度传送工具**：传送工具的功能就是负责将各个分立的零部件通过托盘从零部件馈送器传递到组装位置。如图 11.7 所示，传送工具提供了 4 个自由度的运动，包括沿着 x、y 轴方向的线性运动和围绕 x、y 轴的圆周运动。在 x-y 平面内的传送距离通常在 30 ~ 80 cm 范围内，并且在 x、y 两个方向上的重复精度都可以达到 1 μm。通过两个线性的编码器实现了 100 nm 分辨率的位置反馈，传送工具中的旋转运动是通过微型步进电机实现的，它可以达到每个步进为 0.0028°的最大分辨率[Yang 和 Nelson, 2004]。

5. **实时计算机视觉系统**：必须采用实时的计算机视觉系统才能实现对微组装操作中传送工具、微距定位器以及微操作装置运动过程的控制，同时也必须采用合适的操作软件才能在微组装过程中实现正确的组装策略、过程监测、系统误操作诊断以及错误恢复。

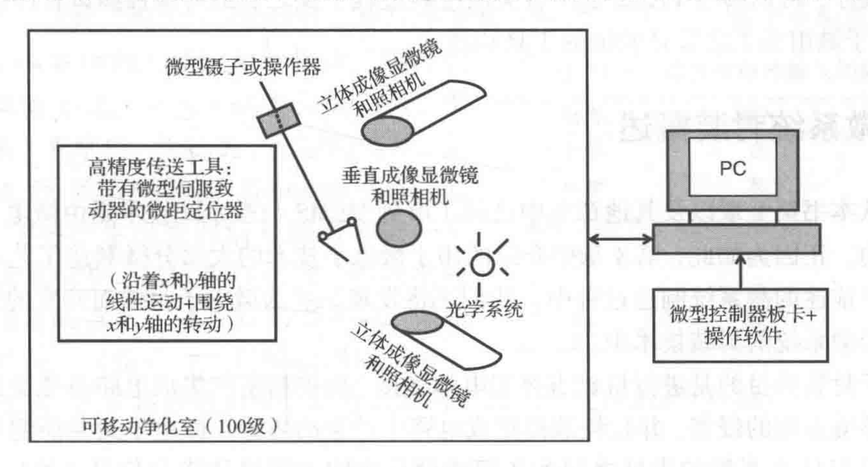


图 11.7　典型的微组装工作单元

11.7　微组装技术中的挑战

尽管我们在本书中自始至终都一直强调经济效益是微系统产业界关心的一个主要问题，但是科学家和工程师们还需要解决一系列的技术问题。

1. **传感**：需要一个能够适用于微观尺度物体的可靠的三维机器视觉和可视化伺服系统，该系统具有亚微米的分辨率和精确的可重复性。在任何一个自动化的微组装工艺中，能够和连续的闭环控制系统集成在一起的各种触觉传感器都是必不可少的。
2. **智能化的终端感知器**：带有智能化终端感知器的微夹钳能够通过自动调节微夹钳的夹持力来定位和匹配相关微器件并加以准确的释放，因此是微组装工艺中急需的。采用微型机器人来完成上述任务也是一个可行的办法。
3. **材料与零部件的传递**：需要具有高精度运动控制能力的高可靠硬件和软件来完成将材料和零部件快速、准确地运输和传递到组装位置的任务，并且系统在实现上述功能的时候必须能够以亚微米的分辨率不断地进行重复。
4. **零件的插入**：需要一些特殊的工具来完成那些微尺度零部件的插入，并且没有影响零部件释放的粘附力。
5. **材料科学**：与材料科学发展相关的问题主要包括以下几点：
   - 用于零部件设计、工具与夹具、夹钳设计与紧固的材料数据库；
   - 与微夹钳上的粘附力相关的表面科学；
   - 在微观尺度上受到温度、压力以及湿度影响材料特性。
6. **微组装设计**：对于微观尺度上相互匹配零部件之间的对准和容差以及微组装和微封装工艺，都必须制定出相应的标准和策略。
7. **工艺模型和模拟方法**：利用包含11.5.3节中讨论的粘附力的按比例缩小法则为微组装工艺开发数学模型，对自动化的微组装工艺过程进行计算机模拟和动画演示。
8. **系统工程**：要制定正确的策略和技术，以利于将微组装工艺和设备由实验室向工厂转移，例如由实验性的微组装工作单元向大批量生产的环境进行转移。
9. **测试方法**：要为微组装过程中的热冲击、振动、潮湿度以及电磁敏感性开发可靠的测试程序，可以参考11.22节中有关微组装过程中及之后的可靠性测试程序的开发。
10. 用于微组装工艺设计验证的工具和技术。

11.8 微系统封装概述

我们从本书第1章以及其他章节中已经了解到MEMS与微系统技术是由微电子技术发展演变过来的。正因为如此，第8章中介绍的用于微电子技术的大部分微制造工艺都可以应用于第9章中描述的微系统制造过程中。我们还将发现某些为微电子封装而开发的技术也同样可以应用于微系统的封装技术中。

微电子封装的目的是进行机械支撑和电学连接，保护精密的集成电路避免受到各种可能的机械和环境方面的侵害，并且耗散掉集成电路中产生的热量。微电子封装所起的另外一个主要作用是保证在器件的内外之间和各组成部分之间的能量传递和信号转换[Lyke和Forman，1999]。然而，MEMS与微系统的封装由于一些额外的要求而变得更加复杂，例如对于许多光学MEMS器件来说要确保其中光的传输和转换，而对于微流体器件中的化学和生物传感应用来说则要确保其中流体的传送与转换以及环境通道的畅通。

在微电子集成电路和微系统器件中，封装技术是影响器件可靠性的关键因素。图11.8所示是一个典型的集成电路封装结构示意图，其中涉及到的主要可靠性问题包括：

1. 硅芯片和钝化层开裂；
2. 芯片与芯片附着层、压焊片及塑料保护层之间的分离；
3. 相互连接处的疲劳失效；
4. 焊接点的疲劳断裂；
5. 印制电路板的翘曲。

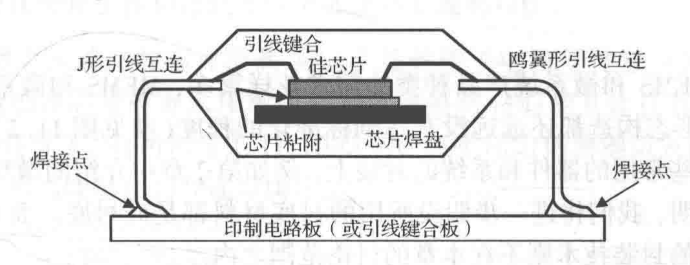


图 11.8 一个典型的集成电路剖面结构示意图

上面所列举的绝大多数失效都是起因于过大的热机械应力，而这些热机械应力则是由以下几个主要原因所引起的[Hsu, 1992]：

1. 相互连接材料之间热膨胀系数的失配；
2. 由于热循环和机械振动所导致的材料疲劳断裂；
3. 由于受到环境效应(例如湿气)的影响所导致的材料强度退化；
4. 由第 8 章中介绍的微加工工艺所引起的本征应力和应变。

以上所列的所有出现在微电子器件封装中的问题来源也都会出现在微系统器件的封装技术中。

MEMS 和微系统器件封装所面临的主要挑战在于，这些产品中的核心元件(例如微传感器和致动器)通常都包含一些既精密又复杂的三维几何结构，它们一般是由不同材料构成的多层结构。这些三维几何结构往往需要与环境中一些不太友好的工作介质相接触，比如一些高温高压的液体和有毒的化学物质。同时它们还被期望可以产生出不同类型的信号，例如机械的、光学的、生物的、化学的信号，如表 11.4 所示[National Research Council, 1997]。这些产生出来的信号还需要进一步被转换成电信号，以便可以快速、精确地解释这些结果的意义。对于致动器来说，微系统的封装技术又给设计工程师们提出了另一个新的挑战，那就是静电力或热动力来源与驱动元件之间的接口问题。

表 11.4 微系统中的输入和输出信号

信号	输入	输出
化学	是	是
电学	是	是
流体/水力学	是	是
磁学	—	是
力学	是	是
光学	是	是

11.9 封装设计的一般考虑

在整个产品的开发周期中，对 MEMS 和微系统产品进行合适的封装是一个至关重要的因素，有许多方面需要认真地加以考虑。在着手开展具体的设计分析之前，以下几点是工程师们需要考虑的主要设计要求：

1. 整个组件在制造、组装和封装过程中所需的成本;
2. 所设计产品可以预期的环境影响,例如温度、湿度、化学毒性等;
3. 对产品封装设计中的错误操作及偶然事故要有充分的考虑;
4. 要选择合适的材料以确保封装的可靠性;
5. 尽量减少电气接插头和连接点的数量,以便使引线断开和产生故障的可能性降到最低值。

由于市场对 MEMS 和微系统产品种类的需求花样繁多,MEMS 和微系统产品的几何结构、组成材料以及形态构造都还远远没有达到标准化的程度(参见图 11.2)。因此我们将把主要精力集中在一些常用的器件和系统的封装上,例如第 2 章中介绍的微型压力传感器和致动器。除非特别说明,我们将进一步假设所用的衬底材料都是硅衬底。而采用 LIGA 工艺制作的绝大多数器件的封装技术则不在本章的讨论范围之内。

11.10 微系统封装的三个层次

与电子器件的封装具有 4 个结构化层次所不同的是,微系统的封装可以划分为 3 个层次:

第一级:芯片级;
第二级:器件级;
第三级:系统级。

这三个层次封装技术之间的相互关系如图 11.9 所示,其中每个层次封装工作的主要任务将在下面分别加以介绍。

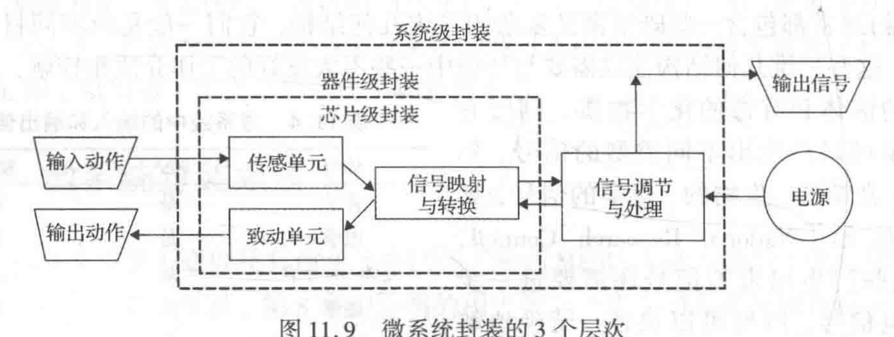


图 11.9 微系统封装的 3 个层次

11.10.1 芯片级封装

芯片级封装包括组装并保护微型器件中大量精密的元件,例如:

- 图 2.8 和图 2.9 所示的由芯片/振动膜/固定底座组装成的压力传感器;
- 图 2.19 和图 2.21 所示的致动器中的悬臂梁;
- 图 2.34 ~ 图 2.37 所示的振动膜-检测质量组合的加速度计;
- 图 2.31 和图 2.32 所示的微型电动机中的电极;
- 包含图 2.41 和图 2.42 所示的微型阀、图 2.43 所示的微型泵以及图 10.19 和图 10.22 所示的微管道在内的微流体元件。

芯片级封装的主要目标是：

1. 保护芯片或其他核心元件，避免其发生塑性变形或破裂；
2. 保护有源电路，使其能够完成系统中的信号转换功能；
3. 对上述这些元件提供必要的电学和机械的隔离；
4. 确保整个系统在正常工作和过载条件下都能够实现其功能。

很多 MEMS 与微系统器件的芯片级封装也涉及到用于电信号传输和转换的引线键合技术，例如在压力传感器芯片中嵌入压敏电阻并用电路将它们相互连接起来(参见图 2.9 和图 10.4)。在某些情况下，还可以像图 11.10 所示的微型压力传感器以及图 11.11 所示的微加速度计那样包括将引线键合到互连金属片上。

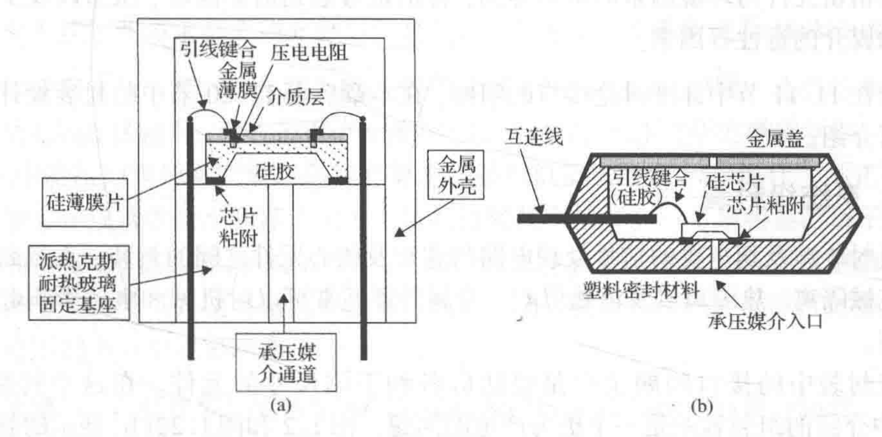


图 11.10　微型压力传感器的芯片级封装：(a)采用金属外壳；(b)采用塑料封装

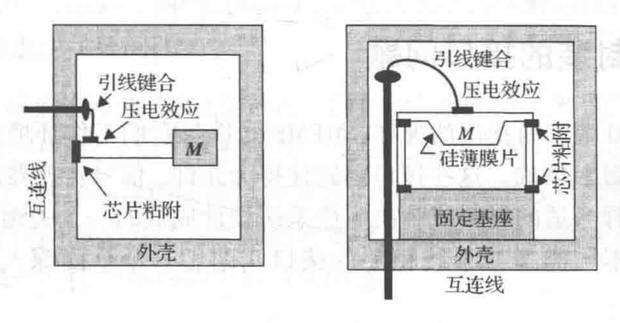


图 11.11　微加速度计的芯片级封装

通过比较图 11.8、图 11.10 及图 11.11 可以发现，集成电路芯片的封装技术确实与 MEMS 芯片的封装在这个层次上有着很多共同的特点。这两个封装技术的相似之处包括：(1)都会用到硅芯片；(2)都涉及到芯片的粘合；(3)都存在芯片与外部金属接口之间的引线键合。因此集成电路封装领域在这三个方面所开发和使用的各项技术都可以直接应用于 MEMS 芯片的封装技术中。在 MEMS 和微系统的封装中，包封芯片和键合引线的外壳既可以是塑料，也可以是不锈钢材料(参见图 11.10)，但是在集成电路的封装中则不使用不锈钢包封材料。

在芯片级封装中还存在几个与芯片的隔离及保护相关的问题，我们将在后面的 11.20 节中采用特殊的封装设计案例来具体讨论这些问题。

11.10.2 器件级封装

如图11.9所示，器件级封装要求包含适当的信号调节和处理电路，在大多数情况下，对于传感器和致动器来说都要求包含电桥电路和信号调节电路。对输入的电信号功率进行适当的调节通常总是必不可少的。典型的器件级封装形式就是如图1.6所示的微加速度计。

对于设计工程师们来说，器件级封装最主要的挑战是与接口相关的问题。接口问题包括以下两方面的内容：

1. 精密的微芯片及核心元件的接口与已经封装好产品的其他部分具有完全不同大小的尺寸；
2. 这些精密元件与环境因素的接口界面，特别是考虑到诸如温度、压力以及工作媒介与接触媒介的毒性等因素。

我们将在11.11节中详细讨论接口的问题，在本章后面11.20节中的封装设计案例中同样也会有所介绍。

11.10.3 系统级封装

系统级封装涉及到主要的信号处理电路与芯片及核心元件之间的封装。系统封装需要对电路进行机械隔离、热隔离以及电磁屏蔽。金属外罩通常可以对机械和电磁影响起到非常好的保护作用。

系统级封装中的接口问题主要是要适应各种不同尺寸的元件。在这个封装层次上，11.5.1节中介绍的组装容差是一个更为严重的问题。图1.2和图1.22(b)展示的就是系统级封装的微型压力传感器，而图1.8展示的则是系统级封装的微加速度计。

11.11 微系统封装的接口问题

正如我们在11.10节中所指出的那样，MEMS元件与它们工作环境之间的接口问题往往是对设计工程师们的最大挑战。这些接口问题使得为元件、信号转换器以及为密封工作介质和其他电磁场影响选择合适的材料成为决定微系统设计成败的一个关键因素。在以下的章节中，我们将对与各种不同类型微系统相关的接口问题做一个全面深入的论述[National Research Council, 1997]。

生物医学接口：2.2.2节中所介绍的生物医学传感器和生物传感器中的封装接口问题要比其他类型微系统中的封装接口问题更为至关重要。作为一种医疗产品，微生物系统通常受到政府的严格管制。该系统的封装技术必须要与人体生物系统完全兼容，而且希望其能够在一个特定的使用寿命内正常发挥作用。因此通过封装形成的每一个微生物系统都必须要满足以下与接口相关的各项需求：

1. 在产品的整个使用周期中能够抵抗各种化学物质的腐蚀；
2. 当其用作生物传感器时，在良好受控的条件下允许如2.2.2节中所描述的那样同各类生物材料相混合；
3. 用作如起搏器的仪器导管时，不会对周围的生物细胞造成损害和伤害；
4. 不会引起不希望的化学反应，例如导致封装器件与接触细胞之间的腐蚀作用。

光学接口：目前有两种主要类型的光学 MEMS 器件投入使用，一种是与光的导向器件有关，如包含微镜和反射器的微开关，如图 1.12 所示；另一种是光学传感器，如 2.2.4 节中所述。这两种光学 MEMS 器件都要求：

1. 适宜光束接收和反射的合适通道；
2. 适宜光束接收和反射的合适表面涂层；
3. 在器件的有效使用期内，确保表面涂层的耐久性品质；
4. 裸露的表面能够有效抵御外部杂质的沾污；
5. 封装的外壳能够抵御潮湿的影响，环境的潮湿可能会引起精密微型光机械元件之间的相互粘连。

所有上述这些需求都必须充分得到满足，只有这样才能确保光学 MEMS 器件的质量。

力学接口：力学接口涉及到 MEMS 器件中运动部件的设计问题。这些运动部件需要同它们的驱动机构连接起来，而这些驱动装置可能是热学的、流体力学的或磁学的，就像图 2.41 ~ 图 2.43 中的微型阀和微型泵以及其他微致动器和机器人中所示的那样。不正确地处理接口问题可能会导致这些微小元器件出现严重的故障甚至损坏。一个最明显的例子就是热驱动的微型阀和微型泵，这类器件中的膜要与工作媒介发生接触，接口处的热接触条件会对膜结构的性能产生负面影响并使膜结构中出现过大的应力。另外，接口的机械密封是这类 MEMS 器件需要克服的另一个主要问题。

机电接口：电气绝缘、接地和屏蔽是这类 MEMS 与微系统中的典型问题。这些问题在低工作电压范围的系统中表现得更为明显。例题 10.1 所展示的就是一个最直接的关于机电接口设计的实例。为这类微器件的电气端口以及电气连接的屏蔽层选择合适的材料是其封装技术中另一个需要考虑的主要问题。

微流体接口：我们在本书多处已经介绍了微流体器件在化学和生物医学应用上的突出表现，其中在 10.7 节中特别介绍了这些应用中有关毛细管电泳(CE)的特殊价值。这些系统需要精确的流体传送、热和环境的隔离以及流体的混合。应用材料的兼容性，例如微管道材料与其中流体的兼容性问题是另外一个关键的要求。微流体的密封以及微管道接触壁与流体之间的接触界面是两个与接口相关的主要封装问题。

11.12　基本的封装技术

参见图 11.1，微系统元件的封装就是在微组装操作中对微小的零部件不断实施“夹取和摆放”的工艺过程，详细的步骤已经在 11.4 节中做了介绍。微系统的封装技术主要涉及到微小元件的键合以及按照要求对器件进行密封处理。我们在本章一开始就已经提到过，尽管研究人员和工程师们还在不断地探索着新的技术、工艺和材料，但是 MEMS 与微系统的组装和封装尚缺乏工业标准。我们不可能在本章中把所有新的封装技术全面地阐述一遍，我们在下面的几节中介绍的是针对大多数 MEMS 产品的封装所必需的一些基本技术，这些技术包括：(1)晶圆片切割形成不同的衬底；(2)将不同元器件键合到衬底上；(3)将信号转换器与处理电路通过引线键合连接起来；(4)将这个微器件包装密封起来。

11.13　芯片准备

很少会出现这样的情况，即使用一块完整的硅晶圆片只生产一个MEMS或微系统芯片，或者使用一块晶圆片仅生产一个微器件。实际情况一般如图11.12所示，即不同微系统中所需要的成百上千的微小芯片都是在同一个硅晶圆片上制作出来的。这些硅芯片由于是按照批量生产方式制作出来的，因此它们的类型和大小尺寸完全一样，或者也可能具有不同的形状和不同的尺寸(如图中黑色矩形方块所示)，此时就需要沿着图中所示的虚线将其切割开。

如图11.12所示，沿着虚线将晶圆片切开(在工业技术中称之为划片)才能获得所需的单个芯片。划片时常常将薄的晶圆片固定在粘胶带上，划片所用的刀片通常是由金刚石/松脂或金刚石/镍复合材料制成的，微电子工业所采用的标准划片工艺是沿着硅晶圆片上两个芯片之间的中心线进行划片。芯片的间距要根据划片刀的厚度来确定。举例来说，当划片刀的厚度为20 μm时，芯片的间距可以设为25 μm左右，切轮的直径为75 ~ 100 mm，其标准的转速为30 000 ~ 40 000 r/min。近年来对于300 mm直径的硅晶圆片，采用CO_2或YAG激光器的激光切割技术也变得越来越流行了。

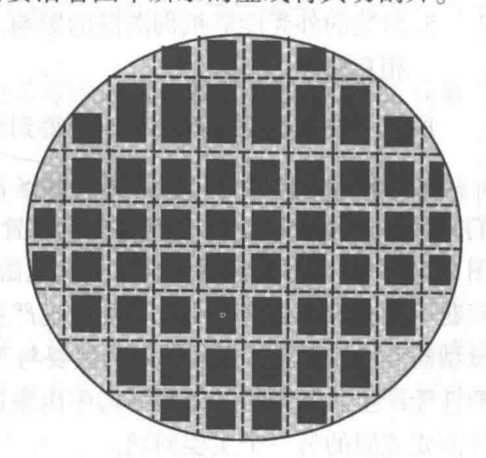


图11.12　制作了芯片的硅晶圆片

11.14　表面键合

微系统元件的键合要比微电子器件的键合更具有挑战性，可以说它是微系统封装技术中最充满挑战性的问题之一，这是因为MEMS与微系统器件通常都是三维的几何结构，它们一般是由多层不同材料所组成的，而且很多这样的微结构都是通过将不同材料的薄层键合在一起形成的。另一个需要考虑的因素则是很多微系统中都会包含有流体或是其他对环境有害的物质，因此需要在很多这样的键合表面处将这些介质完全密封起来。在许多情况下，将这些不同种类的材料键合在一起，既希望可以获得良好的密封性能，又希望密封的表面能够为芯片的隔离提供灵活性，这个问题我们将在11.20节中讨论微型压力传感器的封装工艺时更详细地论述。

微系统产业已经为发展各种新的、更为有效的键合技术和工艺付出了大量不懈的努力，下面几节中将讨论目前常用的几种表面键合技术，有关这些技术更为全面深入的介绍可以参考相关文献[Hsu和Clatterbaugh, 2004]。

11.14.1　粘合剂

粘合剂主要用来将芯片固定到支撑的基座上。举例来说，压力传感器中的硅芯片就是通过粘合剂固定在玻璃基座上的(参见图4.6)。目前有两种常用的粘合剂可以用于芯片的键合技术中，即环氧树脂和硅橡胶。

环氧树脂粘接技术具有很好的柔性，它既能够实现芯片的键合，又可以提供良好的密封作用。好的键合结果既取决于适当的表面处理技术，也取决于对固化工艺条件的控制。但是

很遗憾环氧树脂很容易受到外部热环境的影响，因此粘接工艺必须保持在玻璃态的转化温度以下，通常这个温度在150～175℃之间。

当键合表面的柔性成为最主要的要求时，就必须选用比较柔软的粘接剂。目前商业上可获得的最柔软粘结材料就是硅橡胶，其中的一种这样的粘结材料就是室温下可实现固化的硅橡胶(RTV)，这种材料能够在室温下完成固化，其柔软的自然属性使得它最适合做芯片的粘接材料，并且能够提供最好的芯片隔离，但遗憾的是这种材料抵御化学侵蚀的特性并不太好，当它与空气接触时就会发生剥离和脱落现象，因而不太适合于高压应用的场合。

图11.13所示是一个有关芯片键合方法的一般性图示结构，通常在一个腔体中完成这种采用粘合剂实现芯片键合的过程。首先必须将衬底加热到所需要的键合温度，然后通过一个自动的分配器向衬底表面滴入适量的一层粘合剂薄膜，最后将需要键合的零部件放置到这层粘合剂薄膜上，通常还需施加一定的机械压力以确保键合质量。腔体中必须保持清洁的环境，不得有任何灰尘或其他固态杂物的污染。键合操作经常是在真空环境中进行的。

目前商业上已经能够采购到很多种不同类型的粘合剂，它们都可以用于微系统元件的表面键合技术。下面列出的是这些粘合剂应用于微系统中所必须具有的一些特点：

图11.13　用于粘合剂键合的典型装置(引自[Hsu和Clatterbaugh，2004])

1. 对于机械冲击与振动、热循环冲击、高温冲击、化学侵蚀以及水和油等工作媒介均具有较强的抵御能力；
2. 制备薄膜时具有较低的黏滞性；
3. 具有良好的剪切强度和拉伸强度；
4. 与塑料、金属、玻璃等多种材料都具有很好的键合强度；
5. 对于某些应用来说要求具有优良的导电特性，而对于另外一些应用来说则要求具有很好的绝缘性能；
6. 具有良好的尺寸稳定性，在固化过程中和之后收缩量很少；
7. 能够实现快速固化；
8. 如果粘合剂同时还要用做密封材料的话，则还需具有一定的柔性；
9. 很容易使用化学溶剂去除；
10. 经久耐用。

11.14.2　共晶键合

要将硅芯片或其他类似的元件键合到基座上，可以通过共晶焊接技术来实现。这种键合技术的优点是具有化学上的不活泼特性，同时也具有很好的稳定性和密封特性。

共晶键合涉及到共晶合金原子向待键合到一起的材料原子结构中扩散的过程，最终形成牢固的材料键合结构。为了实现这样的键合结构，首先必须选择出一种合适的材料，它能够与待键合材料形成一种共晶合金。一种常用的能够与硅形成共晶合金的材料就是金的薄膜或含有金的合金薄膜。

当两个需要键合到一起的表面(例如带有金这样的共晶合金成分的硅衬底表面)被加热到超过共晶温度时，就可以实现共晶键合。共晶温度是某种合金材料最低的融合温度，其熔

点温度也是这种合金材料不同组分比例中所可能具有的最低熔点温度。此时界面材料中的原子(例如金原子)就开始快速地向接触的硅衬底中扩散。当有足够多的金原子扩散迁移到键合的衬底表面时就会导致Au-Si共晶合金的形成。随着温度进一步升高到超过共晶温度时,就会形成更多的Au-Si共晶合金。这个过程一直会进行下去,直到界面材料中金原子接近耗尽时为止。在界面处新形成的这个共晶合金材料就可以实现MEMS与微系统的键合作用,同时也可以起到器件密封的作用。

和粘合剂键合一样,微型元件与硅衬底之间的共晶键合通常也是在一个腔体中实现的,该腔体可以提供键合所需要的共晶温度,如图11.14所示。图中键合表面被一层共晶合金(例如Au-Sn)薄膜分开,然后利用重力在这种三明治结构上施加1 MPa左右的压力。整个键合过程可以持续一小时到数小时,最后再在同一腔体中冷却数小时。

采用共晶方法实现芯片键合取决于界面材料组分的选择,这种材料组分必须能够与键合材料形成共晶合金。金是实现与硅衬底键合经常采用的一种材料。一个常用的共晶合金组分是97%的金(Au)和2.83%的硅(Si),其共晶温度是363℃。另一种常用的共晶合金组分是62%的锡(Sn)和38%的铅(Pb),其共晶温度是183℃。后面这种共晶合金的成本更低,而且它能够键合绝大多数金属材料。对于非金属材料的键合来说,必须在其键合表面上溅射一层几微米厚的金属薄膜,这样才能有利于共晶键合的实现。

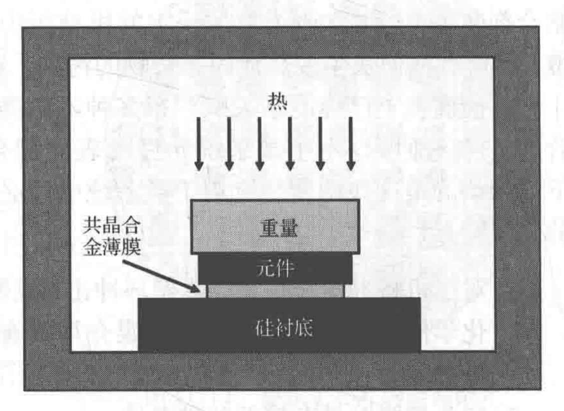


图11.14　一个共晶键合腔体的示意图

11.14.3　阳极键合

这个工艺对于使硅晶圆片粘合到其他几种衬底材料上是非常可靠和有效的,它同时也具有密封性并且是一种低成本的芯片键合方法,该方法在有关文献中也称为静电键合技术或者电场辅助的热键合技术。由于阳极键合技术使用的设备装置相对比较简单,并且价格也比较便宜,因此这种方法在微系统的封装中获得了非常广泛的应用。阳极键合技术还能够提供非常可靠的密封性能,这一点对于微流体网络中的微型阀和微管道应用以及微型压力传感器芯片的应用也是非常重要的。这种阳极键合技术的另一个主要优点就是其键合温度相对来说不太高,一般发生在180℃~500℃之间,这就使得键合工艺完成后材料中残留的应力和应变比较小。

阳极键合技术已经被用来实现以下各种不同材料晶圆片之间的键合:(1)玻璃与玻璃之间;(2)玻璃与硅之间;(3)玻璃与化合物半导体(例如砷化镓)之间;(4)玻璃与各种金属之间;(5)硅与硅之间。

阳极键合技术最常见的应用就是实现玻璃晶圆片与硅晶圆片之间的键合,图11.15所示是一个用于将富含钠的玻璃晶圆片(例如Pyrex 7740派热克斯玻璃)与硅晶圆片键合到一起的装置,在其上施加一个中等的压力以确保不同晶圆片之间具有足够的接触压力,同时给该系统再施加一个200~1000 V的直流电场,其中硅晶圆片一端连接电源的正极。在这种三明治结构中,以两个电极之间的派热克斯玻璃和硅晶圆片作为介质构成了一个有效的平行板电容器,因此外加在两个电极上的电压就使得两个衬底在静电力的作用下紧密地键合在一起。

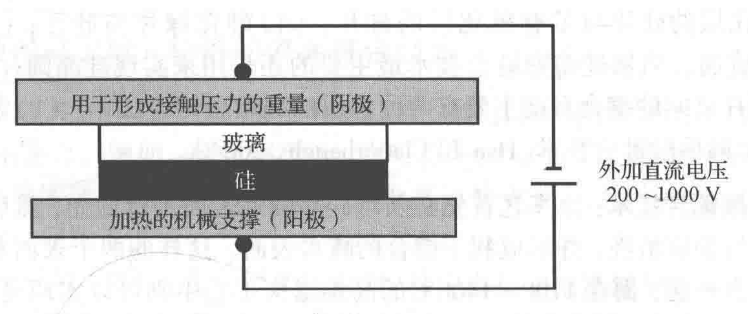


图 11.15　硅与玻璃之间的阳极键合

硅与玻璃之间能够实现键合，是因为在外加电场的作用下，硅与玻璃之间的界面处形成了一层非常薄的二氧化硅（SiO_2）薄膜。在外加电场的影响下，玻璃中的钠离子（Na^+）被电场吸引到负电极处，留下了一个钠离子的耗尽区，其中充满了带负电荷的氧离子（O_2^-），如图 11.16 所示。这些氧离子在加热的系统中能够与相接触的硅离子（Si^+）通过化学键结合，在界面处形成一层大约 20 nm 厚的二氧化硅薄膜。这层二氧化硅薄膜起到了将硅晶圆片与玻璃键合到一起的作用。由于派热克斯 7740 玻璃富含钠离子，因此它在将硅晶圆片与玻璃键合到一起的过程中是一种非常普遍的选择。

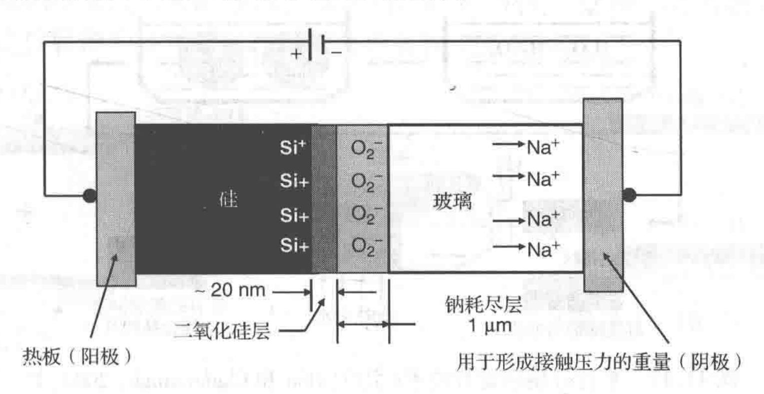


图 11.16　阳极键合过程中二氧化硅层的形成（引自［Hsu 和 Clatterbaugh，2004］）

成功的阳极键合技术要求在键合过程中保持恒定的温度、恒定的外加电压和电流条件，键合所需的时间取决于：（1）键合材料的表面状况；（2）键合温度；（3）外加电压。

在一个温度为 450℃、外加直流电场为 1000 V 的真空腔体中，完成一个直径为 100 mm 的硅晶圆片与玻璃晶圆片之间的阳极键合过程通常需要 10 ~ 20 min。判断键合过程是否完成的方法是通过透明的派热克斯玻璃来观察硅晶圆片键合表面的深灰色区域是否已经从中心区域扩展到整个晶圆片区域。

11.14.4　硅熔融键合

硅熔融键合（SFB）技术可以在不使用中间粘合剂的前提下实现两块硅晶圆片或硅衬底有效且可靠的键合。这种粘合两个硅晶圆片的设想最早起源于 20 世纪 60 年代初期，当时是为了键合分立的晶体管芯片而开发了这种技术［Barth，1990］。但是直到 1988 年才首次报道了这种技术在 MEMS 领域的应用［Petersen 等人，1988］。硅熔融键合技术已经被用来键合以下几种不同的晶圆片组合［Madou，1997］：（1）硅片与硅片；（2）带有氧化层的硅片与硅

片；(3)带有氧化层的硅片与带有氧化层的硅片；(4)砷化镓片与硅片；(5)石英片与硅片；(6)硅片与玻璃。当然硅熔融键合技术最主要的还是用来实现硅晶圆片之间的键合。

实现硅晶圆片之间的键合目前主要有两种常用的硅熔融键合技术：(1)亲水的硅熔融键合技术；(2)水合硅熔融键合技术[Hsu 和 Clatterbaugh, 2004]。

亲水的硅熔融键合技术：该工艺首先必须对硅晶圆片表面进行抛光，然后将晶圆片放入沸腾的硝酸中进行彻底清洗，并形成利于键合的疏水表面。这样的两个表面甚至在室温下都能够自然地键合在一起，而在1100~1400℃的高温退火工艺中则可以实现更强的键合作用。一般认为氢诱导的范德华力是导致这种键合作用的主要作用力。

水合硅熔融键合技术：该工艺首先需要在含有硫酸和双氧水的溶液中对硅晶圆片进行清洗，如图11.17所示。当我们把晶圆片上的硫酸去除并用去离子水冲洗干净之后，就会在其表面形成O-H键，称为硅烷醇键。此时将两块晶圆片重叠放置就可使其成键，进一步的加热处理可以驱使两块重叠晶圆片之间O-H键中的氧分子和氢分子形成Si-O-Si键，如图11.17所示。

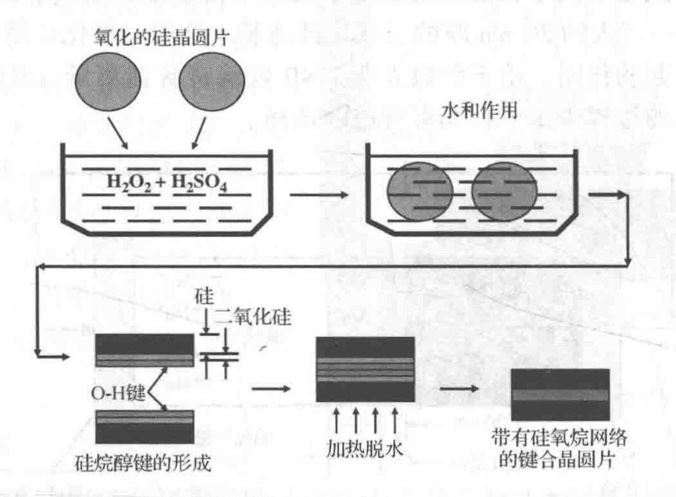


图11.17 水合硅熔融键合技术(引自[Hsu 和 Clatterbaugh, 2004])

11.14.5 表面键合技术概述

微型元件表面键合技术的质量可以根据其密封性和可靠性来进行判断，键合的温度一般希望比较低或中等。表11.5对目前常用的几种键合机理给出了一个非常全面的概括。

表11.5 几种键合方法的比较

键合方法	温度	密封性	可靠性
粘合剂键合	低	否	不确定
共晶键合	中等	是	不确定
阳极键合	中等	是	好
熔融键合	很高	是	好
集成工艺	高	是	好
低温键合	低	不确定	不确定
铜焊	很高	是	好

资料来源：[Lin, 2000]。

表11.5所列的集成工艺键合方法涉及到一些微制造工艺，例如化学气相淀积工艺，这在键合和密封技术中都需要用到，具体细节可以参阅文献[Lin, 2000]。

11.14.6 绝缘层上硅：特殊的表面键合技术

我们从表7.1中了解到硅是一种半导体材料，因此它在高电势的作用下或者是在高温环境下都具有导电能力。例如，硅在温度为125℃以上时会呈现出逐渐增强的导电性[Maluf，2000]。硅从半导体到导体的转变限制了硅传感元件在高温条件下的应用。绝缘层上硅(SOI)工艺给这个问题提供了一个可行的解决方案。

在微电子学领域，SOI工艺是用来防止PN结中电荷发生泄漏的[Sze，1985]，它将硅晶体键合到非晶态的材料(例如SiO_2)上，采用的是8.8节中所介绍的外延晶体生长方法，非晶态材料不具有晶体材料中的那种长程有序结构[Askeland，1994]。

图11.18展示了一个SOI结构的制备工艺过程，该工艺采用了两块硅晶圆片衬底，其中一片的表面上掺杂了大量的硼原子以形成一层P型硅，另外一片的表面生长了一层二氧化硅薄膜，如图11.18(a)所示。然后将两块硅晶圆片叠放在一起，如图11.8(b)所示，并采用硅的熔融键合技术将两块硅晶圆片衬底粘合在一起。再将键合后的硅晶圆片上裸露出来的硅层腐蚀掉，此时重掺杂的P型硅层可以起到腐蚀终止层的作用，如9.2.4节中所述。最后通过上述工艺过程可以获得在二氧化硅绝缘层上有一层P型硅薄膜，或者可以获得两层硅之间夹着一层二氧化硅绝缘层的三明治结构，如图11.18(c)所示。这样一种先将两块硅衬底键合在一起然后再进行腐蚀的技术一般称为键合后腐蚀工艺。

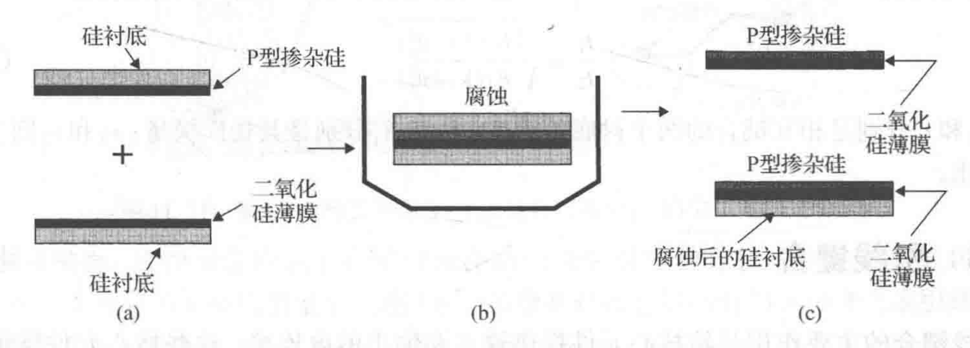


图11.18 绝缘层上硅工艺：(a)两个独立的硅衬底；(b)熔融键合后的腐蚀；(c)绝缘层上硅

我们还可以将氢离子注入到施主硅晶圆片的接触表面来代替上述通过硼掺杂形成的P型硅层，这些活性更强的氢离子可以使得施主晶圆片在低温下就能够与表面生长了SiO_2绝缘层的受主晶圆片发生键合。与前面介绍的键合后腐蚀工艺相比，这种情况下基本上没有材料在腐蚀过程中的损失。

这项技术可以被用来在微沟道上面覆盖一层SiO_2绝缘层[Yun和Cheung，1998]，如图11.19所示。图中展示了在硅衬底上引入一层SiO_2绝缘层的工艺过程。所使用的硅衬底称为受主晶圆片，其上有一个深度为1 μm的嵌入式微沟道。首先在另一块施主晶圆片表面上热生长一层厚度为60 nm的氧化层薄膜，然后再以40 keV的能量向其表面注入剂量为$8\times10^{16}/cm^2$的氢离子(H^+)，将两块晶圆片的表面彻底清洗之后，就可以在室温下将其面对面加以键合。最后，将这对键合好的硅晶圆片快速地加热到470℃，这个温度已经足以在氢离子注入的峰值浓度处引起硅晶圆片的裂解，如图中所示。当受主晶圆片从施主晶圆片上分离出来时，这个裂解面将导致键合的绝缘层粘附在受主晶圆片上，因此最终使得一层SiO_2绝缘层薄膜覆盖在硅衬底上，从而形成内嵌式的微管道。

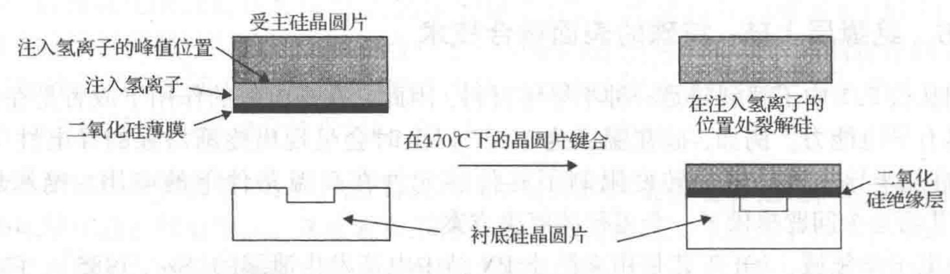


图 11.19　形成内嵌式微管道的SOI工艺

一个类似的工艺还可以用来将P型掺杂的硅晶圆片与石英晶圆片键合在一起[Lee 等人，1997]。我们从前面给出的几个例子中注意到 SiO_2 绝缘层的厚度通常在几微米以内，必须采用比较薄的 SiO_2 层是为了避免由于两种键合材料的热膨胀系数存在较大差别而导致其接触面上产生较大的热应力。如果我们要把一个厚度为525 μm的石英晶圆片键合到厚度超过300 μm的硅晶圆片上，从表7.3中可知石英的热膨胀系数比硅高出3倍，此时为了减少过量的残余热应力就必须将这对键合好的晶圆片在200℃以上的温度进行退火处理。剥离应力是导致键合发生解体的一个主要原因，如果两个相互键合的晶圆片厚度之比满足式(11.4)给出的关系，则可以避免剥离应力的出现。因此该公式对于确定相互键合的两个晶圆片的厚度是非常有用的：

$$\frac{t_1}{t_2}=\sqrt{\frac{E_2(1-\nu_1^2)}{E_1(1-\nu_2^2)}} \tag{11.4}$$

式中，t_1 和 t_2 分别是相互键合的两个衬底的厚度；E_1 和 E_2 分别是其杨氏模量；ν_1 和 ν_2 则分别是其泊松比。

11.15　引线键合

引线键合的主要作用是给核心元件提供输入和输出的电连接，这些核心元件既可以是图11.10所示的压力传感器中的硅膜，也可以是图11.11所示的微加速度计中的执行部件。常用的引线材料是金和铝，其他的引线材料还包括铜、银和钯，引线的直径一般在20～80 μm之间。用于集成电路产业的引线键合技术也可以直接应用于微系统中，目前工业上常用的引线键合技术主要有3种：(1)热压引线键合；(2)锲形-锲形超声引线键合；(3)热超声键合。

超声键合技术可以用在非常脆性的结构中。我们将在后面的章节中概要介绍这3种引线键合技术的工作原理，有关引线键合技术的设备和工艺流程的详细阐述，读者可以参考相关的文献[Pecht 等人，1995]。

热压引线键合：热压引线键合的原理就是将加热的金属球直接压焊到金属焊盘上，如图11.20所示。在图11.20(a)中，金属引线通过一个毛细管键合工具将其末端接头馈送到金属焊盘上，引线的末端接头被火焰加热到400℃后凝结成一个球状，此时底部为半球状的键合工具向下运动，直接将引线球压到焊盘上[如图11.20(b)所示]。经过大约40 ms的压接之后，键合工具向上收回，引线就被键合到焊盘上了，如图11.20(c)所示。将金属引线球键合到平坦的金属焊盘上涉及到两个物理过程：通过键合工具将金属球压到焊盘上所引起的塑性形变以及两种键合材料之间的原子相互扩散融合。

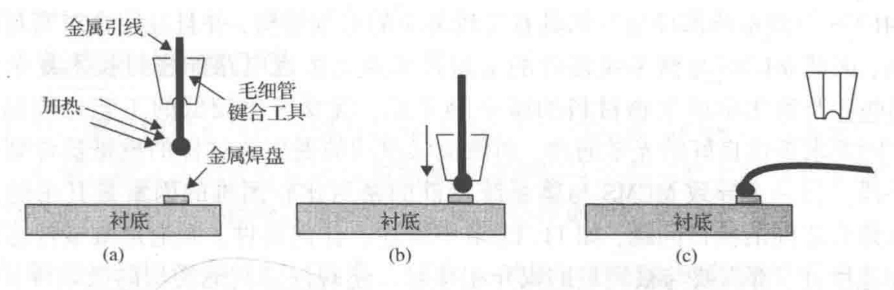


图11.20　热压引线键合：(a)加热；(b)加压；(c)完成键合之后

锲形-锲形超声引线键合：不同于热压引线键合，超声引线键合是一个低温工艺过程，其键合工具是一个可以馈送金属引线的锲形结构。键合所需的能量是由超声波提供的，它是由一个超声换能器产生的，该超声换能器带动锲形结构的键合工具以20～60 kHz的频率振动。键合工具平行于金属焊盘表面运动，如图11.21(a)所示。到达所需键合的目标焊盘上方之后，锲形工具再向下运动到焊盘表面，通过施加压力，同时超声能量在接触表面上释放出来，从而完成表面键合[如图11.12(b)所示]。典型的键合时间在20 ms左右。

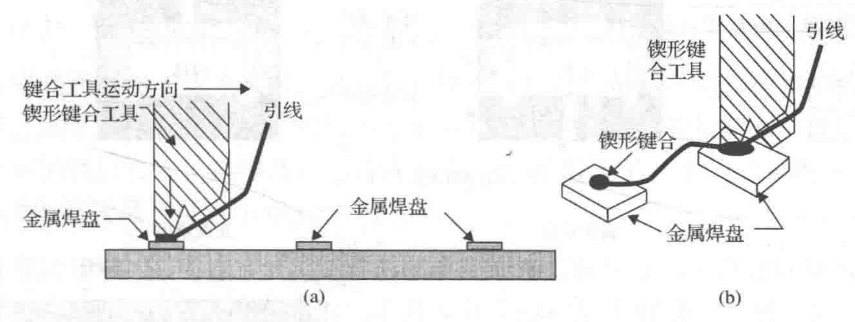


图11.21　锲形-锲形引线键合：(a)键合过程中；(b)完成键合之后

热超声键合：这种键合技术结合了前面介绍的两种引线键合技术，它可以在100℃～150℃这样一个相对不太高的温度下，通过超声能量和热压能量同时起作用来完成引线键合。它也要使用一个毛细管键合工具来提供球形的引线接点。

对于MEMS应用来说，引线键合经常采用球形-锲形相结合的接头或锲形-锲形相结合的接头，如图11.22所示。

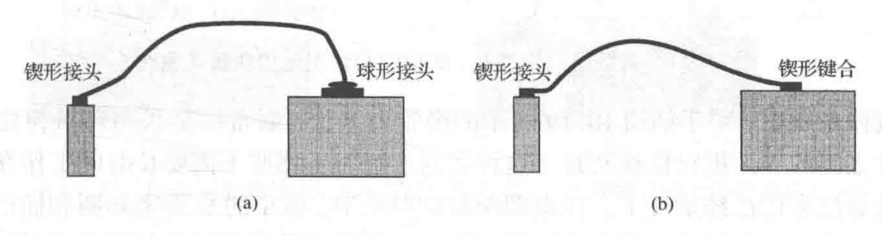


图11.22　用于微系统的引线键合：(a)锲形-球形引线键合；(b)锲形-锲形引线键合

11.16　密封与封装

对于各种微器件来说，将其中组装好的微小元件密封起来既是十分可取的，也是非常必要的。此外密封好的微器件还必须很好地封装保护起来，以避免各种来源于外部的机电干扰和环境影响。

由于 MEMS 与微系统器件通常都具有比较复杂的三维结构，并且往往会对密封提出很多不同的要求，因此 MEMS 与微系统器件的密封技术要比集成电路的密封技术复杂得多。例如，对于那些涉及到化学或生物材料的微系统来说，就要求比较低的工艺处理温度，光学 MEMS 器件则要求提供良好的光学通路，而像梳状驱动的谐振器这样的机械器件则必须采用真空密封手段。另一个导致 MEMS 与微系统器件的密封比较困难的因素是其中的某些关键元件与工作媒介之间的接口问题，如 11.11 节中所述。任何器件，无论是微型传感器还是带有阻尼的加速度计，都需要与被测量的媒介相接触。还有许多其他类型的微器件，如在微流体系统中的微管道、微型阀和微型泵，也都需要和工作的流体相接触。无论从保护内部精细的核心元件(例如敏感单元、止回阀或致动梁等)的角度出发，还是从确保器件能够正确完成其功能的角度考虑，所有这些器件和系统都需要在封装中将接触的流体完全密封起来。因此对设计工程师来说，密封是一个主要的技术挑战。

图 11.23 展示了流体必须密封的几种情形，图 10.19 展示的则是微管道的密封过程。

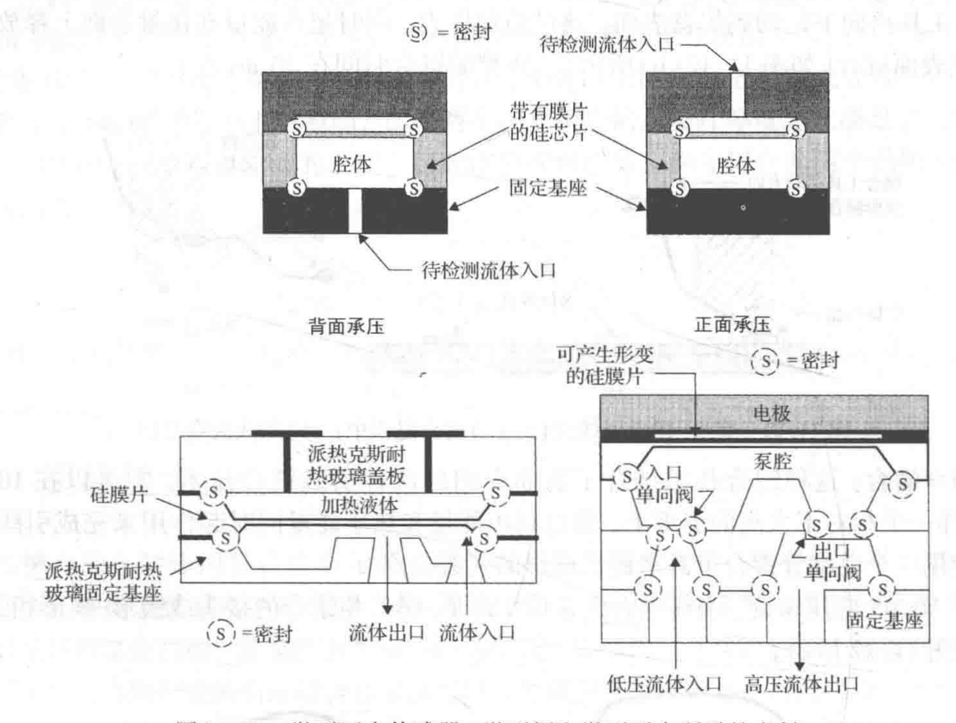


图 11.23 微型压力传感器、微型阀和微型泵中所需的密封

在微流体系统中，对于如图 10.19 所示的微管道来说，通常都是采用环氧树脂来对相互匹配零部件之间的界面进行机械密封。这种密封方法对于那些不需要长时间工作在高温和有毒介质中的器件来说已经足够了。在微型阀和微型泵中，微小的 O 形密封圈和插槽式接触面相配合就是一个非常有效的密封方法。还有许多其他类型微系统元件的可靠密封则需要用到很多复杂的物理-化学工艺。

研究人员正在努力开发一些用于微封装的新型密封工艺。许多已经报道出来的密封技术都过于复杂并且只针对一些特殊的材料和应用领域，有关各类不同的密封与封装技术的详细介绍可以参阅文献[Chiao 和 Lin, 2004]报道。这里我们将介绍几种看上去更为一般的密封与封装技术。

11.16.1　集成化的封装工艺

通常人们习惯采用第 8 章中介绍的各种微制造工艺来完成 MEMS 与微系统器件的密封与封装工作。采用这种方法的优点是可以在晶圆片切割划片之前对其上的微型零部件进行晶圆片级的密封处理，下面介绍的就是两种采用这种密封处理方法的实例。

微壳层密封：制作微壳层的目的是为了保护微器件中精细的传感单元或执行元件的，图 11.24 展示了这些微壳层的制作方法。

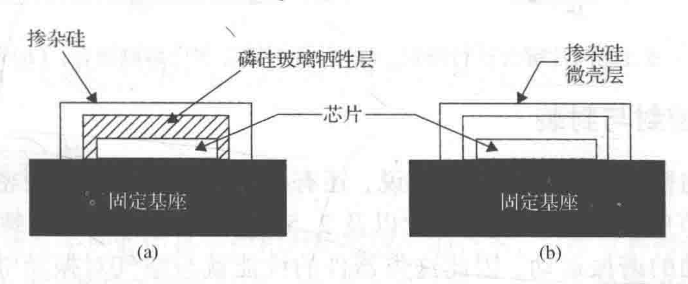


图 11.24　用微壳层进行密封：(a)带有牺牲层的情形；(b)牺牲层被腐蚀掉之后的情形

可以采用表面微加工技术来制作微壳层。整个工艺过程包括首先在待保护的芯片上淀积一层牺牲层，如图 11.24(a)所示，然后再在牺牲层上淀积一层微壳层材料，最后利用一个腐蚀工艺过程将牺牲层去除。这样就在芯片和微壳层之间形成了一个间隙，如图 11.24(b)所示，这个间隙的厚度最小可以小到 100 nm 左右。

反应性密封技术：这项技术依靠特定的化学反应来给相匹配的元件之间形成必要的密封结构，如图 11.25 所示。首先在待密封的芯片及其支撑衬底上放置一个密封盖，二者之间留有一个很小的间隙，如图 11.25(a)所示。然后将整个装置进行一次类似 8.5 节中介绍的热氧化工艺这样的化学反应，从硅盖帽底部和硅衬底表面生长出的 SiO_2层可以对芯片起到非常可靠且有效的密封作用。

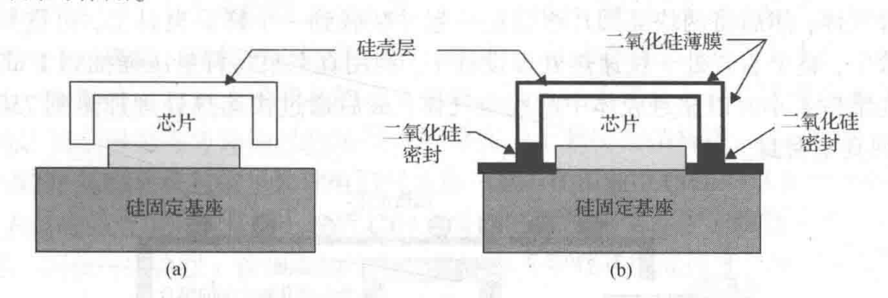


图 11.25　反应性密封技术：(a)未密封的封装；(b)通过氧化实现密封的封装

11.16.2　通过晶圆片键合进行密封

和图 11.25 所示的反应性密封技术不同的是，这种密封技术可以不采用中间层而直接将一个密封盖倒扣在核心元件上来实现芯片的密封，二者之间的接触界面则采用 11.14 节中介绍的表面键合技术来完成密封。图 11.26 展示了这种技术在微器件密封领域的应用。

这种密封技术要用到两块晶圆片，其中一块晶圆片衬底的表面已经制备好了所需要的微

结构，另一块用作密封盖的晶圆片表面带有一个空腔，然后利用表面键合技术将二者在相互接触的界面处键合起来，采用的表面键合技术可以是如图11.26(a)所示的粘合剂键合或硅熔融键合，也可以是如图11.26(b)所示的阳极键合。

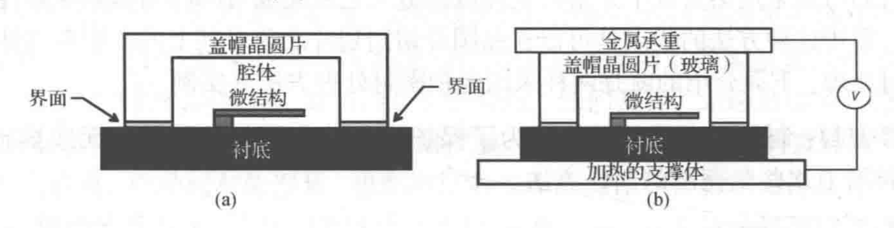


图11.26 通过晶圆片键合进行密封：(a)粘合剂键合和硅熔融键合；(b)阳极键合

11.16.3 真空密封与封装

对于MEMS与微系统器件的封装来说，还有很多情况需要将其中密封的空间保持为真空。像2.5.1节中介绍的微加速度计以及2.5.2节中介绍的微陀螺仪这类器件都涉及到一个梳状驱动的谐振运动，因此这类器件的性能就与空气对振动电极的阻尼特性有关。如果让这类器件工作在真空中，就可以显著提升其性能。还有一些微光学开关也希望采用真空密封，因为如果器件中有空气存在的话，也会给其中运动的部件带来额外的阻力。

真空密封技术对很多工艺设计工程师来说是一个挑战。目前对于微系统的真空密封已经报道了两种可行的技术[Chiao和Lin, 2004]，它们分别是：(1)利用快速热处理(RTP)工艺实现密封；(2)利用局部化学气相淀积(CVD)工艺实现密封。

利用快速热处理键合工艺实现密封： 这种键合技术原来是为涉及到铝与氮化物之间快速热处理键合的微器件的真空密封而开发的[Chiao和Lin, 2004]，快速热处理工艺是微电子器件键合过程中常用的一种方法。参见图11.27，首先将待密封的器件和盖帽的晶圆片一起放入300℃的真空石英炉管中预烘烤4小时，预烘烤的目的是驱除工艺制造过程中不同材料上吸附的各种气体；然后将两块晶圆片组装在一起并装载到一个样品夹具上，再重新放入真空加热的炉管中，整个装置处于快速热处理设备中，利用真空泵将背景压强抽到1 mTorr，并将这个真空度维持4小时以驱赶腔体中的残余气体；最后通过快速热处理加热到750℃并维持10秒钟实现真空密封。

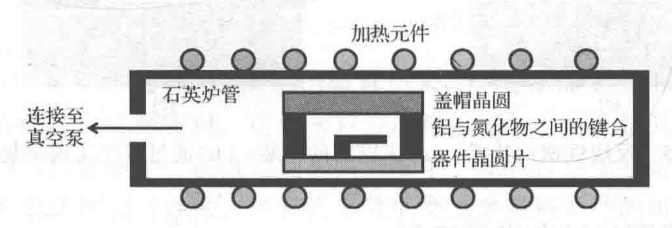


图11.27 利用快速热处理键合实现真空密封

利用局部化学气相淀积工艺实现密封： 这种方法最早是在文献[Chang-Chien和Wise, 2001]中报道的，如图11.28所示，首先采用腐蚀工艺在硅衬底上制备出一个空腔，然后将微结构装配并键合到硅衬底上，再将硅衬底通过阳极键合方法键合到一个玻璃盖板上；如图11.28(a)所示，在硅衬底与玻璃盖板之间留有一个排气口，并在排气口处利用多晶硅材料

制作出一个微型加热器；然后将整个装置放入通有硅烷的真空腔体中，并维持腔体中的压力为250 mTorr；最后通过微型加热器的加热使得硅烷发生分解形成多晶硅的局部淀积，从而将排气口密封，如图 11.28(b)所示。这种密封排气口的 CVD 工艺过程可以通过化学反应式(8.16)来描述。

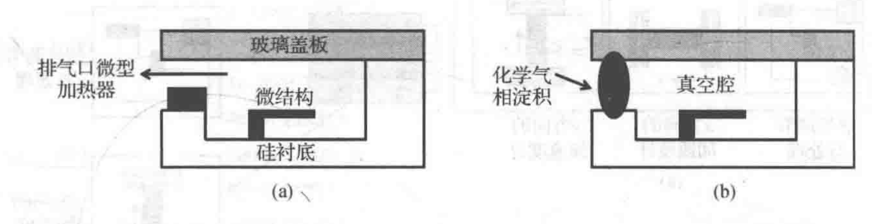


图 11.28 利用局部化学气相淀积工艺实现真空密封：(a)预真空密封；(b)实现真空密封之后

11.17 三维封装

三维封装在微电子产业中是一种相对比较成熟的技术，它涉及到将多个集成电路芯片以及多芯片模块(MCM)重叠在一起形成一个紧凑的组装形态。下面列出的是关于三维封装方法所希望具有的一些特点[Lyke 和 Forman，1999]，其中的某些特点也同样适用于对 MEMS 与微系统器件的三维封装：

1. 高的容积效率；
2. 层与层之间大容量的信号传输能力；
3. 能够适用于多种不同类型层的叠加；
4. 能够对其中的基本可重叠单元进行隔离和访问，以便对其进行修改、维护或升级；
5. 能够适用于多种不同的工作模式，例如模拟、数字、射频功率等；
6. 封装各层之间具有良好的散热；
7. 高数目的封装引脚与下一层次封装之间具有高的电信号传输效率。

如表 1.1 所示，由于我们很早以前就已经认识到 MEMS 以及大多数微系统在几何结构上就是三维的这一事实，因此对于许多工程师来讲“三维微系统封装”这个术语可能会出现一些意义上的不明确性。对于这些产品的三维封装，从真实的意义上说，是将功能不同的微器件和微系统以及信号处理电路通过封装技术堆叠在一个紧凑的结构中。

把 MEMS 或微系统与信号处理电路封装在一起，在工业上已经可以实现所谓的“片上实验室”，这方面的一个实例就是图 1.6 所示的封装好的微加速度计。三维封装可以使得整个系统更加紧凑，例如可以将在 x 轴和 y 轴方向上工作的两个力平衡加速度计重叠放置在一起，这两个堆叠的加速度计还可以再放置在信号处理芯片的上面，这个基本的思路如图 11.29 所示。大多数利用毛细管电泳原理做生物分析的微流体器件都是采用这种“片上实验室”的结构制造出来的。

各种不同功能的 MEMS 和微系统器件与信号处理单元的堆叠都需要用到 11.12 节 ~ 11.16 节中介绍的许多基本封装技术。但是，在很多这类的微系统中，对电磁效应和热效应的屏蔽以及对运动流体的密封则是这类封装技术中至关重要的问题。必须正确地设计各种机电之间的连接导线，同时也必须合理地密封好各种界面之间的接口。

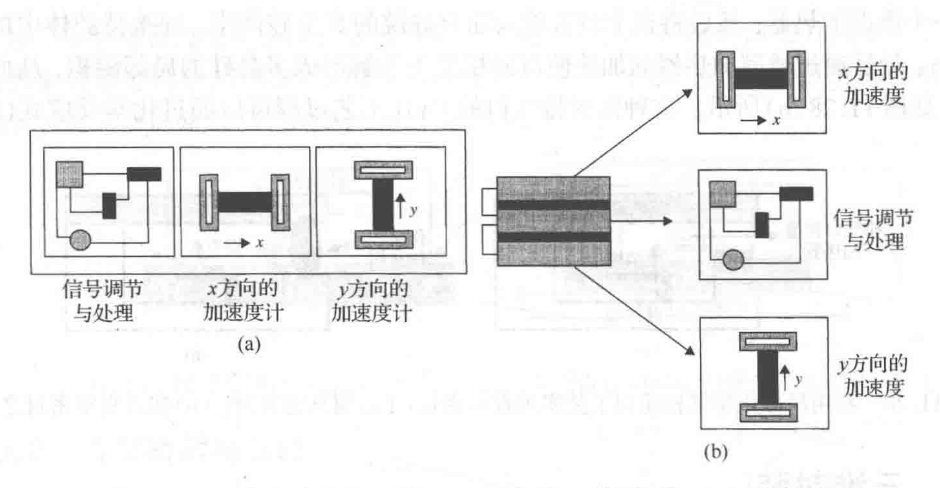


图 11.29 三维封装的基本思路：(a)平面(二维)封装；(b)三维封装

11.18 封装材料的选择

7.11 节对各种封装材料做了一个概括，在这一节中我们将进一步详细考察这些封装材料。这些材料的大多数特性都可以满足设计的要求。表 11.6 给出了微系统中可用于封装各种零部件的材料总结。表 11.7 列出了一些常用芯片封装材料的特性。

表 11.6 微系统封装的常用材料

微系统部件	可使用的材料	评价
芯片	硅、多晶硅、砷化镓、陶瓷、石英、聚合物	参考第 7 章和 10.2.2 节
绝缘层	SiO_2、Si_3N_4、石英、聚合物	所列材料的质量和成本按照递增的顺序排列
固定基座	玻璃(派热克斯玻璃)、石英、氧化铝、碳化硅	派热克斯玻璃和氧化铝是更为常用的材料
芯片键合	焊锡合金、环氧树脂、硅橡胶	焊料的密封性更好，而硅橡胶的绝缘性更好
引线键合	金、银、铜、铝、钨	金和铝是最常用的
互连引脚	铜，铝	
顶盖和外壳	塑料、铝、不锈钢	

表 11.7 芯片封装材料性能总结

材料	杨氏模量(MPa)	泊松比	热膨胀系数(ppm/K)
硅	190 000	0.29	2.33
氧化铝	344 830 ~ 408 990(20℃) 344 830 ~ 395 010(500℃)	0.27	6.0 ~ 7.0(25 ~ 300℃)
焊料(60Sn40Pb)	31 000	0.44	26
环氧树脂 (Ablebond 789-3)	4100		63(126℃以下) 140(126℃以上)
硅橡胶 (Dow Corning 730)	1.2	0.49	370

资料来源：[Schulze，1998]。

在进行设计分析时，设计工程师们一定要注意芯片键合材料强烈的温度相关特性。表 11.8 和表 11.9 给出了表 11.6 中所列的焊锡合金和环氧树脂材料的温度相关特性。用插值法和外推法可以进一步确定所给定温度和应力范围内或范围外的材料特性。

表 11.8 焊锡合金 60Sn40Pb 性能随温度的变化

应变范围(10^{-6})	杨氏模量(MPa)	泊松比	屈服强度(MPa)
0~500	46 100(−40℃)	0.32	60
	27 700(25℃)	0.43	38
	17 000(125℃)	0.43	14
500~1500	27 800(−40℃)	同上	同上
	16 200(25℃)		
	4670(125℃)		
1500~3000	5600(−40℃)	同上	同上
	5290(25℃)		
	1140(125℃)		
3000~10 000	1490(−40℃)	同上	同上
	700(25℃)		
	210(125℃)		

表 11.9 环氧树脂(Ablebond 789-3)性能随温度的变化

应变范围(10^{-6})	杨氏模量(MPa)	泊松比	屈服强度(MPa)
0~500	7990(−40℃)	0.42	55
	5930(25℃)	0.42	60
	200(125℃)	0.49	1.5
500~2000	4680(−40℃)	同上	同上
	4360(25℃)		
	110(125℃)		
2000~10 000	3830(−40℃)	同上	同上
	3620(25℃)		
	60(125℃)		
10 000~20 000	3610(−40℃)	同上	同上
	2650(25℃)		
	40(125℃)		
20 000~30 000	1790(25℃)		
	30(125℃)		

资料来源：[Schulze, 1998]。

测量得到的硅橡胶(RTV)的应力与应变之间的关系表现出了很大的离散性，这种材料在各种不同温度下杨氏模量的平均值大约为 1 Pa。

11.19 信号的转换和传输

11.19.1 微系统中典型的电信号

信号的转换和传输涉及到开发并确立相关的策略，以便可以据此为微系统选择传感器的类型及其安装位置，这也是微系统封装中最重要的问题之一。我们已经从 11.10.2 节中了解到，在微系统的器件级封装中，信号转换是其中的主要部分。由传感器或致动器芯片产生的电信号或机械信号必须转换成易于测量和处理的要求形式。已经有多种不同类型的信号转换器被用于这个目的，如图 10.2 所示，其中电信号的形式参见表 11.10。

表11.10 微系统中常用的信号转换器

转换器	电信号	输入或输出	典型应用
压敏电阻	电阻 R	输出	压力传感器
压电	电压 V	输入或输出	致动器, 加速度计
电容	电容 C	输入或输出	静电力致动器, 压力传感器
电阻加热/形状记忆合金	电流 i	输入	致动器

可以采用伏特表和安培表来测量表11.10中列出的电压信号和电流信号。接下来将介绍采用电桥技术来测量电阻和电容的方法。

11.19.2 电阻的测量

测量应变电阻或压敏电阻阻值变化的最常见方法是采用惠斯通电桥方法，其典型的电桥电路如图11.30所示。图中4个电阻连接成电桥形式，一个恒压源为电路提供恒定的输入电压 V_{in}。在这个电桥电路中，我们将电阻 R_1 由一个应变电阻或压敏电阻来取代，该电阻的阻值会随着应力所引起的形变而发生变化，我们以 R_g 代表应变电阻或压敏电阻的阻值。对可变电阻 R_g 的测量有两种模式：静态平衡模式和动态偏移工作模式[Histand 和 Alciatore, 1999]。

- **静态平衡模式**：通过调整电阻使 a、b 端之间的输出电压 V_o 为零，从而使电桥达到平衡。在此平衡条件下，满足以下关系式：

$$\frac{R_g}{R_4}=\frac{R_3}{R_2} \tag{11.5}$$

由此式可以求出电阻 R_g 的阻值为：

$$R_g=\frac{R_3R_4}{R_2} \tag{11.6}$$

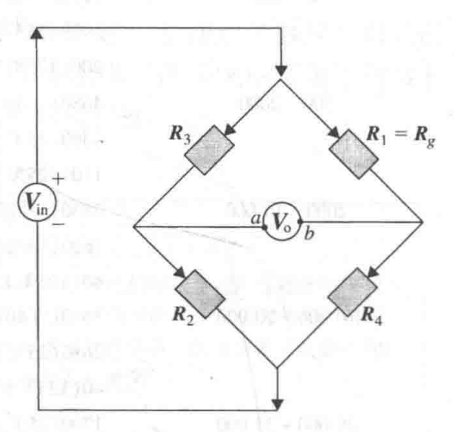


图11.30 一个典型的惠斯通电桥电路

- **动态偏移工作模式**：如果由于外加负荷的变化，应变电阻或压敏电阻的阻值在不断地发生变化，此时就必须采用动态偏移模式。在这种连续变化的模式下，输出电压 V_o 可以表示为：

$$V_o=V_{in}\left(\frac{R_g}{R_g+R_4}-\frac{R_3}{R_2+R_3}\right) \tag{11.7}$$

因此电阻 R_g 的阻值变化可以根据下式求得：

$$\frac{\Delta R_g}{R_1}=\frac{\frac{R_4}{R_1}\left(\frac{\Delta V_o}{V_{in}}+\frac{R_3}{R_2+R_3}\right)}{1-\frac{\Delta V_o}{V_{in}}-\frac{R_3}{R_2+R_3}}-1 \tag{11.8}$$

式中，R_1 是电阻 R_g 的初始电阻值。

11.19.3 压力传感器中信号的转换和传输

压敏电阻是用来把微型压力传感器的薄膜上感知的机械压力转换为相应的电阻变化。有很多种方法都能够把这些压敏电阻安装在薄膜的表面之下。

图11.31(a)所示是4个具有同样电阻率的压敏电阻放置在正方形薄膜4条边的正中间，这种布局方式是最常见的一种设计方案。在薄膜的左右两侧分别有一个电阻，它们的取向是

用来感知张应力的；另外两个压敏电阻放置在薄膜的顶部和底部边缘，由于泊松效应原理，它们可以用来感知压应力。这种布局设计在电阻阻值的测量方面可以获得最大的增益。图 11.31(b)所示是一个装有 4 个电阻的矩形薄膜，这 4 个电阻具有完全相同的取向，其中两个电阻的位置靠近隔膜的边缘且与之平行，另外两个电阻则置于薄膜的中心附近。这种布局设计方案能够增加电阻的灵敏度，且可以使用一个中心凸台或两个中心凸台来会聚应力并尽量减小输出信号的非线性。图 11.31(c)所示的设计方案是用来测量切应力的，但是由于压敏电阻的非对称性，这种设计方案比其他几种设计方案更容易受到热补偿的影响。

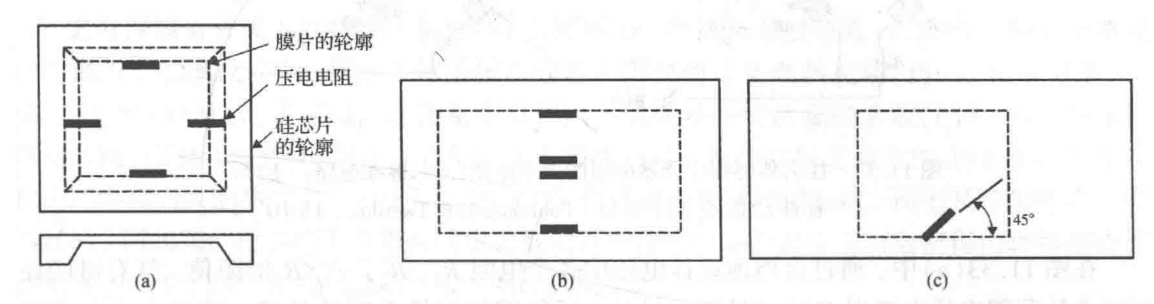


图 11.31　压力传感器中压敏电阻的几种设计方案：(a)方形芯片/方形薄膜；(b)矩形芯片/矩形薄膜；(c)用于剪切形变的测量

在如图 11.31(a)所示的压力传感器中，正方形薄膜的四周有 4 个压敏电阻，其正确的惠斯通电桥连线方案如图 11.32(b)所示，相对应的电阻布局设计方案如图 11.32(a)所示。

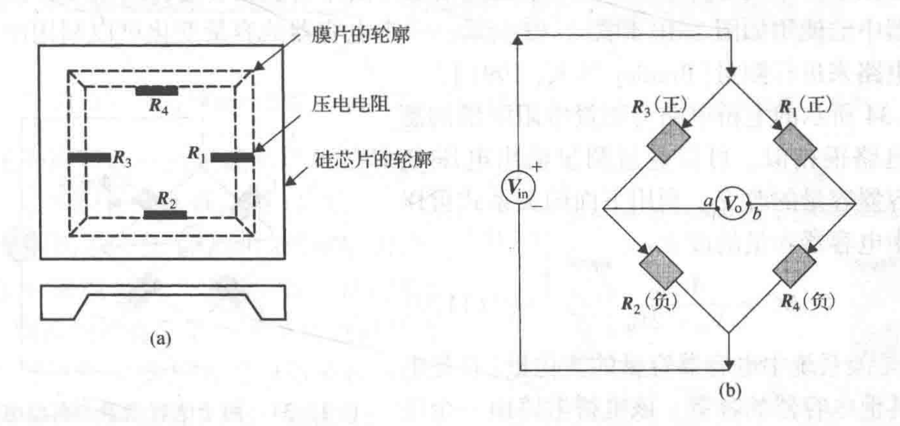


图 11.32　带有正方形薄膜的压力传感器电桥：(a)正方形薄膜上的压敏电阻；(b)对应的惠斯通电桥

要想利用惠斯通电桥准确地测量出压敏电阻的阻值变化(由薄膜上所施加的压力引起的)，需要满足合适的条件，其中有两点必须特别注意：

1. 正如 7.6 节中所述，由于电阻温度系数(TCR)和压敏电阻温度系数(TCP)的改变，压敏电阻的电阻率偏移平衡和温度补偿也会发生变化。
2. 当温度升高时，由于压敏电阻的热膨胀，必须对其灵敏度进行归一化、线性化和温度补偿处理。

失调电压通常是由惠斯通电桥电路的失配所引起的，也可能是由薄膜或压敏电阻在之前的压力载荷循环中留下的残余应力而导致的。因此在薄膜上没有施加任何压力时，电桥电路就会处于不平衡状态且其输出电压不为零。在典型情况下，要实现满量程百分之一的输出失

调补偿就必须增加额外的电路，这些额外的电路既可以设计在薄膜上也可以不在薄膜上，其电路如图11.33所示[Pourahmadi和Twerdok，1990]。

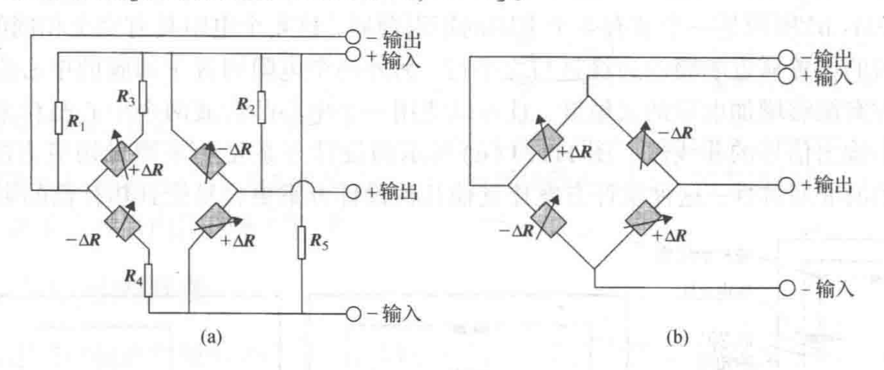


图11.33 压力传感器中压敏电阻的典型电路：(a)标准电路；(b)带有补偿的电路(引自[Pourahmadi和Twerdok，1990])

在图11.33(a)中，通过合理地设计电路中各个电阻R_1，R_2，…，R_5的阻值，就有可能在所要求的范围内使失调误差达到最小。另外，还能够将压敏电阻的补偿电阻嵌入在硅薄膜上，在这种情况下，整个电路就变得更加简单了，如图11.32(b)所示。

11.19.4 容抗的测量

电容在微系统中既是常用的致动器，也是常用的信号转换器，电容式信号转换器在微型压力传感器中的使用如图2.10和图2.12所示。一个电容器的容量变化可以利用图11.34所示的简单电路来进行测量[Bradley等人，1991]。

图11.34所示的电桥电路与测量电阻阻值的惠斯通电桥电路很相似。可以通过测量输出电压V_o来确定电容器容量的改变。利用下面的关系式可以确定电路中电容器容量的改变：

$$\Delta C = \frac{4CV_o}{V_{in} - 2V_o} \tag{11.9}$$

式中，ΔC是微系统中电容器容量的变化量；C是电桥电路中其他电容器的容量。该电桥电路由一个电压为V_{in}的恒压源供电。

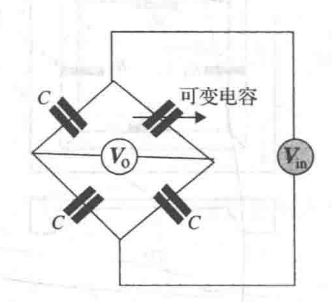


图11.34 用于电容测量的典型电桥电路(引自[Bradley等人，1991])

11.20 压力传感器封装设计案例

下面通过一个微型压力传感器的封装设计实例来展示封装设计中所包含的主要设计步骤。

芯片和衬底的准备：这个层次的封装首先必须定义和构造出硅芯片，并利用硅晶圆片生产出这些硅芯片。设计工程师必须牢记7.4.2节中介绍的有关各种标准硅晶圆片大小及尺寸的限制。硅衬底或硅芯片的厚度受到所选择的硅晶圆片尺寸的限制，因此仔细估算出一个标准硅晶圆片上能够切割出的硅芯片或硅衬底的最大数目是必要的。划片技术已经在11.13节中

介绍过了。在把大的硅晶圆片切割成小的硅芯片和硅衬底方面，许多公司都有其自己建立起来的一套工艺步骤。

主要的封装考虑： 芯片是决定 MEMS 器件或微系统能否实现其正确功能的最关键元件。正如第2章中所述，芯片是产生或接收各种信号的元件，对这些芯片进行适当的封装是非常必要的，这样才能使周边的环境条件不会对其预定的机械性能或电子性能带来任何影响。因此在封装一个微型压力传感器以及其他类似的 MEMS 器件或微系统时，芯片的隔离是一个主要的考虑因素。

芯片隔离常常成为封装设计中的一个关键环节。我们来考察如图 11.35 所示的一个典型的微型压力传感器芯片。该压力传感器的硅芯片需要固定在派热克斯(Pyrex)玻璃基座上，如图 11.35(a)所示。硅芯片、芯片粘附材料以及玻璃基座的热膨胀系数(CTE)具有非常显著的差别，如图 11.35(b)所示。正如 4.4.3 节中所述，各种材料之间 CTE 的不同将会在芯片中产生相当大的热应力。由于这些热应力是热环境在薄膜中引起的，而不是外加的压力而引起的，因此我们把这些不希望有的应力称为寄生应力。这些寄生应力会使得由转换器输出的信号变得不准确，并给测量结果带来明显的偏差。

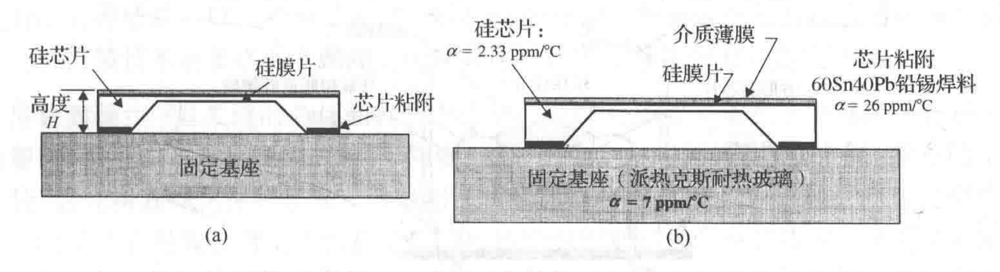


图 11.35 芯片隔离示意图：(a)典型几何结构；(b)芯片粘附材料的热膨胀系数

芯片的隔离可以通过正确的芯片结构设计和芯片粘附技术设计来实现。图 11.35(a)中的高度 H 对于隔离芯片免受基座的机械应力影响和热效应影响来说是一个重要参数。H 的数值越大，给薄膜提供的自由弯曲的空间也就越大。但是压力传感器芯片的 H 值受到用来制造硅腔室的标准硅晶圆片厚度的限制。如图 11.36 所示的间隔层能够进一步改善芯片的隔离，并为芯片提供额外的弯曲空间。但是这个额外增加的部分也会明显增大封装的成本和芯片的整体尺寸。

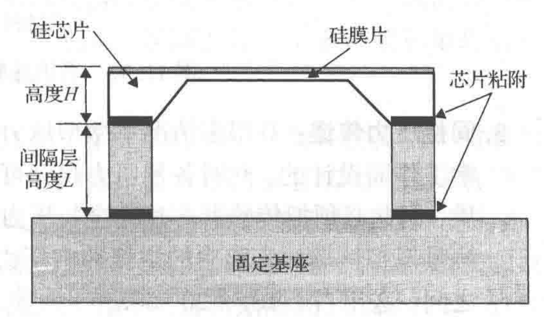


图 11.36 用于芯片隔离的间隔层

芯片固定： 这一步涉及到将芯片键合到支撑的基座上，支撑的基座可以是玻璃、陶瓷或金属。芯片的键合需要使用合适的粘附材料和键合技术，如图 11.10 所示。一般说来，有 3 种方法可以把芯片固定到支撑基座上：(1)阳极键合技术；(2)共晶焊技术；(3)粘合剂粘附技术。详细情况可以参阅 11.14 节。正如 11.14 节中所述，每一种芯片键合方法都有其长处，同时也有其不足之处。

芯片保护： 我们在 11.11 节中已经说明了为什么要将压力传感器芯片保护起来，以免受

到外界压力媒介的接触。由于微型传感器中的硅芯片与上面介绍的情况非常类似，因此可以考虑使用下面 3 种常见的方法来保护这类传感器中的硅芯片[Bryzek 等人，1991；Schulze，1998]。

1. **气相淀积有机物：**有一种称作聚对二甲苯的材料可以用于此目的。利用接近室温条件的 LPCVD 工艺，可以将这种材料淀积在芯片表面，形成一层均匀的钝化层，淀积之后再进行退火处理。对于一直要工作到 105℃的传感器来说，通常覆盖的钝化层厚度不要超过 3.5 μm。由于覆盖的钝化层会使薄膜变硬，因此它对器件的性能有一些不利的影响。因而覆盖层厚度对薄膜灵敏度的影响是这种方法在实际应用中的一个限制因素。但是这种技术在保护传感器芯片及键合引线方面还是非常有用的。
2. **覆盖硅凝胶：**通常比较实用的芯片保护方法是在芯片表面涂敷一层硅凝胶，如图 2.12 以及图 11.37 所示。这种硅凝胶由一种或两种硅油组成。首先在芯片表面涂敷一层厚度为毫米量级的硅凝胶膜，然后对其进行固化。这种芯片保护技术在很多压力传感器中都应用得非常成功。硅凝胶很低的弹性模量使得覆盖层对薄膜灵敏度的影响减小到了最低程度，同时能够保护芯片免于与压力媒介直接接触。

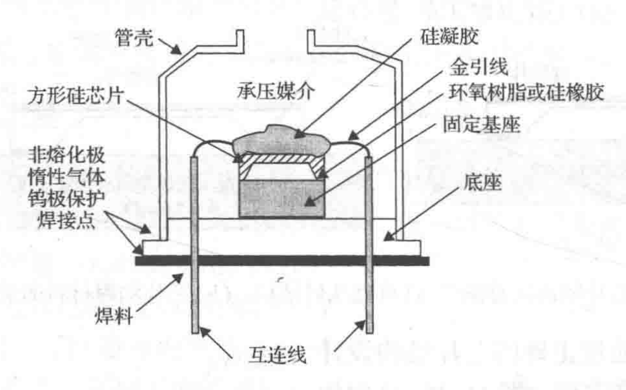


图 11.37　采用硅凝胶的芯片保护技术

3. **间接压力传递：**有很多情况下微型压力传感器是为了能够在一些比较严酷的环境中正常工作而设计的，此时各种压力媒介可能是具有高强度腐蚀特性和破坏能力的化学物质，因此必须把传感器芯片完全与压力媒介隔离开。例如，可以用微型压力传感器来测量模拟核爆炸实验中的空气冲击压力，此时测量的压力范围介于 70 kPa ~ 350 MPa 之间，这相当于 10*g* ~ 20 000 *g*(*g* 为重力加速度)的冲击力。除了这些极端的机械力学条件之外，有些压力测量还要能够适应有高速尘埃粒子、高强度光线的恶劣环境，甚至需要承受在几个毫秒内温度上升到 5000 ℉的严酷条件。在这种情况下，坚固的封装是确保这些传感器能够不受损坏并能够正常工作的唯一途径[Bryzek 等人，1991]。美国加州的 Lucas NovaSensor 公司研究出了在这种极端环境下工作的特殊压力传感器的封装技术，该方法利用了充油的不锈钢薄膜，如图 11.38 所示。

从图 11.38 中可以看到，芯片与键合引线都浸泡在硅油中。外部媒介的压力施加在薄的不锈钢薄膜上，然后再通过不可压缩的硅油把压力传递到硅薄膜上。要设计不锈钢薄膜使其柔量至少低于硅薄膜的百分之一，这样才能尽量减小封装在其中的硅油的热膨胀效应对芯片机械响应的影响。

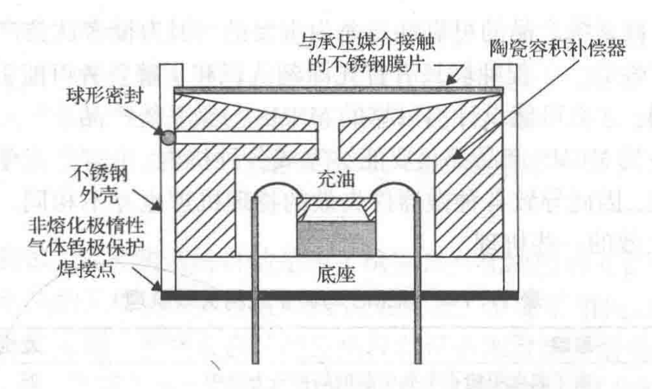


图 11.38 用于芯片保护的充油不锈钢薄膜

封装在其中的硅油的热膨胀显然能在硅薄膜上产生不希望有的热应力，从而使测量产生误差。因此硅油的用量应尽量保持最低。可以把采用低热膨胀材料（例如陶瓷）制作的容积补偿器插入到封装结构中，以填充芯片与不锈钢薄膜之间的空间。

用来传递压力的硅油在注入到封装结构中之前，必须经过烘烤以便去除其中的气体。这种类型的压力传感器可以用来测量高达 350 MPa 的压力。但是这种封装技术的成本很高，原因在于这种封装技术的要求非常苛刻，而且对这类特殊传感器的需求量也比较低。

器件级封装：一旦关键的芯片和键合引线都已经被合理地安装在支撑基座上之后，就可以采用塑料（参见图 1.2 右侧的封装）、陶瓷（参见图 1.2 中间的封装）或金属（参见图 1.2 左侧的封装）管壳将其钝化保护起来。该级封装的主要任务是实现信号转换、芯片与用户接口之间互连的设计和封装。对于工作在中等温度环境中的微型压力传感器通常采用塑料密封技术，而对于高温工作环境则必须采用金属密封技术。与集成电路制造技术中一样，塑封管壳也是采用注入压模技术实现的，而金属封装管壳则是通过焊接技术和熔接技术实现的。目前对于微器件的封装技术还没有建立起一套标准的工艺流程，实际上每一个微系统在最终的产品封装技术上都需要一个有针对性的设计。

系统级封装：在很多种情况下，内部布局如图 11.10 所示的器件在对外发货时的封装形式如图 1.2 所示，而消费者往往会将传感器和调节电路重新装入新的封装结构中。尽管这是实际需要，但是通常会增加成本，因为微系统的封装总是围绕着现有的工程系统来进行的。一个较好的解决办法是将基本的调节电路与传感器封装在一起。在这种情况下，封装必须既能够提供对于电路系统的电磁屏蔽，也能够提供必要的机械隔离和热隔离，如图 1.22(a) 和图 1.22(b) 所示。如果这样的防护措施不充分，那么测量的精度就会受到影响。通常金属管壳能够提供对于机械影响和电子影响充分的保护，而将传感器与调节电路整合在一起的塑封技术则更加适用于大批量生产的目的，在这种情况下，通常就需要利用薄金属层来实现必要的电磁屏蔽。

11.21 MEMS 封装的可靠性

任何 MEMS 与微系统产品要想成功地实现商业化应用，其封装的性价比与产品的可靠性是两个关键的因素。可靠性问题的关键在于，无论一个产品设计得多么精细、制造得多么复杂，只要在其预期的工作寿命期限内不能正常地实现其设计的功能，该产品就已经失去其使

用价值了。MEMS 与微系统产品的可靠性是尤为重要的，因为很多这类产品的失效或故障可能是灾难性的和毁灭性的。工程师们只有首先深刻认识和了解各种可能引起结构失效或导致这类产品故障的机制，才有可能设计出可靠的 MEMS 与微系统产品。

通常设计出的各类 MEMS 产品都是要能够完成各种机电、化学、光学、生物以及热流体动力学等不同的功能，因此导致各种微器件失效的物理机理也互不相同。表 11.11 列出了有关 MEMS 与微系统失效的一些机理。

表 11.11 MEMS 与微系统的失效机理

失效模式	原因	发生概率
机械	由于表面粗糙不平而引起的局部应力集中	低
	不恰当的组装容差	中等
	振动诱生的长周期疲劳失效	硅中较低，塑料中稍高
	多层薄膜的脱层剥离	中等或高
	热膨胀系数失配引起的热应力	高
机电故障	由于形变过量引起的电极损坏	高
材料退化	塑料及聚合物的老化与脱气；材料的腐蚀与磨损	中等
本征应力过大	微加工过程中引起的残余应力和内在分子力	高
封装	键合与密封方法不当，芯片防护与隔离不良	高
环境效应影响	温度、湿度、尘埃、毒气	高

资料来源：[Hsu, 2006]。

11.22 可靠性测试

发展可靠性测试的目的是探讨微器件失效的机理，并预测微器件的有效工作寿命。表 11.11 中所列的各种微器件的失效机理大多数都很难在器件的设计阶段就准确地预测出来，因此在微器件制造、组装与封装过程中对其进行令人信服的测试就成了确保其可靠性的必要手段。目前集成电路的可靠性测试已经建立了相对比较成熟的方法和判断标准，与之不同的是，微系统的可靠性测试则远没有实现标准化。这主要是因为微系统涉及到机电、光学、化学以及生物等不同功能的相互结合，并且很多这样的微器件还涉及到各种形式的力、惯性、位移、压力、流体流动以及具有化学、光学或生物特性的复杂的输入/输出。事实上对于工业界来说，每当推出一种新产品，就必须开发出各种相应的可靠性测试程序和判断标准。我们在本节中介绍的只是在做这些开发工作时需要考虑的一些基本要素[Oliver 和 Custer, 2004]，其中有些问题可能是非技术性的，之所以把它们包含在这一节中，是因为它们与产品的质量及可靠性密切相关。

可接受的器件性能范围：工程师们首先必须给产品的各项测试结果设定一个通过与否的标准。这个标准过宽可能会减少微型元件制造过程中不必要的返工数量，但是却有可能降低产品的质量。反之当这个标准过窄时，则有可能造成不必要的浪费。总之这个标准只需窄到足以使得用户能够准确预测器件的性能即可。

参数测试：与其等待一个产品中所包含的所有元件都已经被制造、组装并封装完毕之后再进行产品的可靠性测试，一个更好也更经济的办法是在一些关键元件的制造过程中就对其进行质量检验。因此工程师们必须准确定义出能够恰当地描述这些元件功能的相关参数要

求，依据这些参数要求人们就可以设计并完成相应的测试工作。为此目的必须开发出特殊的测试结构，这些测试结构在组装和封装过程中必须和各种元器件结合在一起。在相关的参考文献中可以找到对这些特殊的参数测试结构的介绍[Oliver 和 Custer, 2004]。符合要求的参数测试与正确地选择工作部件的测试点紧密相关，这也是测试设计任务的另一个重要组成部分。

组装过程中的测试：组装测试的目的是为了确保只有无缺陷的元器件才会被组装和封装到系统中。对于待组装的元件，既要做直观的视觉检查，也要采用机器对其进行测试检验。在很多种情况下还需要采用一些精心设计的专用仪器设备来对部分组装好的元件性能进行测试。图 11.1 就展示了一个压力传感器芯片组装和封装过程中的测试和检查工作。

老化与最终测试：老化测试是集成电路在制造过程中为确保产品的可靠性而采取的一项常规办法。对于 MEMS 和微系统来说，这样的测试通常就会涉及到以机械振动、加电或通入流体等方式(可以参见表 11.11 中所列的各种方式)给器件进行载荷试验。在某些情况下，在最终制造完成的器件发送给客户之前，还可以把热循环、热冲击过程中的加速负载以及高湿度等其他可以预计的环境条件施加到器件上来对其进行老化考核。

自测试：即使在发送给客户之后，很多微器件在设计上还可以按照常规的方法对其进行自测试。一个具有自测试能力的微器件同样也可以保障其服务对象的可靠性。开展这些测试的主要目的是为了确保器件能够实现正确的功能。自测试过程中会使用电激励方式来模拟真实的输入载荷。

使用过程中的测试：这种使用过程中的测试对于校准诸如传感器这类器件的功能是非常必要的。

显而易见，要在微系统生产的不同阶段对其进行各种相应的测试，在相关的设计和开发策略方面还需要投入很大的精力。毫无疑问，要开展这些精密的测试，特别是很多测试还是在现场原位进行，还必须开发出各种专用的仪器仪表技术、测试工具及待测器件夹具等。我们决不能忽略了可靠性测试的重要性，也不能忽略了微制造过程中与这个任务相关的成本。

本章习题

第一部分：多项选择

1. AP&T 是英文________的缩写。

   (1)应用物理与技术；(2)组装规划技术；(3)MEMS 与微系统的组装、封装及测试

2. 微系统生产过程中单步成本最高的阶段是________。

   (1)设计；(2)微加工；(3)组装、封装与测试

3. 微系统组装过程中的一个主要问题是缺少________。

   (1)标准；(2)实际应用；(3)资金

4. 微组装过程中的一个主要问题是缺少________。

   (1)对于零部件及其夹取容差的策略；(2)收益；(3)需求

5. 微组装过程中一个严重的非技术问题是缺少________。

   (1)对于组装区域的全局了解；(2)人机交互；(3)人与工件的互动

6. 显微镜的放大倍数越高，则其物镜下面的工作景深________。
(1)越短；(2)越长；(3)不变
7. 显微镜的放大倍数越高，则其视场范围________。
(1)越宽；(2)越窄；(3)不变
8. 在设计微型镊子或微型夹钳臂的过程中，存在的一个问题是其几何结构具有________。
(1)较大的深宽比；(2)较小的深宽比；(3)奇怪的形状
9. 微组装中涉及到的容差通常是在________量级。
(1)微米；(2)毫米；(3)厘米
10. 几何容差是________中所固有的。
(1)微加工过程；(2)设计参数；(3)客户规范
11. 微型元件的尺寸容差是由________决定的。
(1)微加工过程；(2)设计参数；(3)客户规范
12. 在抓取微型元件的过程中，一个主要的要求是________。
(1)足够的抓取力；(2)精确的抓取定位；(3)足够的释放力
13. 太高的抓取力将会导致工作部件的________。
(1)释放；(2)损坏；(3)错误摆放
14. 太小的抓取力将会导致工作部件的________。
(1)滑落；(2)损坏；(3)错误摆放
15. 在微组装过程中，对于一个智能化的终端感知器的基本要求是其能够感知________。
(1)夹取力；(2)温度；(3)湿度
16. 微组装的“夹取与摆放”操作中存在的一个严重问题是________。
(1)夹取正确的工件；(2)准确摆放工件；(3)释放工件
17. 从夹钳上释放微小的工件比较困难，其原因在于工件的________。
(1)重量太小；(2)质量太小；(3)尺寸太小
18. 导致工件从夹钳上难以释放的粘附力起源于________。
(1)静电力；(2)范德华力；(3)上述两种力的组合
19. 由潮湿环境引起的一种粘附力起源于________。
(1)氢原子力；(2)表面张力；(3)水的黏滞力
20. 静电力是由________而产生的。
(1)两个紧密靠近的表面之间积累的电荷；(2)电场感应的电荷；(3)掺杂工艺引入的电荷
21. 开发微组装工作单元是为了实现________。
(1)自动化组装；(2)准自动化组装；(3)微系统的快速组装
22. 在微组装工作单元中使用立体显微镜和立体照相机的目的是为了获得更好的________。
(1)微系统图像；(2)组装工件微结构的三维视图；(3)组装记录
23. 微型定位器的基本功能是________。
(1)合理地定位工件的位置；(2)精确地定位工件的位置；(3)将工件传递到组装地点
24. 在微组装工作单元中使用微型机器人的目的是进行________。
(1)微区定位；(2)微操作；(3)微区定位与微操作的结合
25. 微组装的三个最优先的研发领域是________。
(1)传感、智能化的终端感知器、材料与零部件的传递；
(2)传感、零件插入、工艺模型；
(3)测试方法、材料传递、智能化工具设计
26. 在微系统领域有________个层次的封装技术。
(1)两；(2)三；(3)四

27. 最柔软的芯片粘附固定(键合)材料是________。
(1)焊料合金；(2)环氧树脂；(3)硅橡胶
28. 硅树脂凝胶是用来________的。
(1)保护芯片；(2)加固芯片；(3)隔离芯片
29. 在压力传感器的硅芯片中经常使用的间隔层是用来________的。
(1)增大强度；(2)增大空间尺寸；(3)改善芯片隔离
30. 硅/玻璃衬底之间的阳极键合发生在________条件下。
(1)高温；(2)高温与高压；(3)高温与高电压
31. 阳极键合技术最常用于________之间的键合。
(1)硅与玻璃；(2)硅与硅；(3)硅与铝
32. 硅与玻璃之间的键合依赖于________的形成。
(1)共晶合金层；(2)二氧化硅层；(3)O-H 键层
33. 硅与硅之间的共晶键合依赖于________的形成。
(1)共晶合金层；(2)二氧化硅层；(3)O-H 键层
34. 硅与硅之间的熔融键合依赖于________的形成。
(1)共晶合金层；(2)二氧化硅层；(3)O-H 键层
35. 给相互键合的部件上施加一个高压电场的原因之一是为了保持键合部件的________。
(1)平整；(2)紧密接触；(3)电离
36. 硅熔融键合发生在________条件下。
(1)高温；(2)高温与高压；(3)高温与高电压
37. 硅熔融键合常用于________之间的键合。
(1)硅与硅；(2)硅与玻璃；(3)硅与石英
38. 英文缩写 SOI 代表________的含义。
(1)离子的分离；(2)绝缘层上硅；(3)绝缘层上衬底
39. 采用 SOI 技术是为了防止________。
(1)电荷的泄漏；(2)热效应的泄漏；(3)硅衬底上腐蚀的扩散
40. SOI 工艺通常在________下进行。
(1)1000℃左右的高温；(2)500℃左右的中温；(3)低于 200℃的低温
41. “剥离”工艺通常在________下进行。
(1)1000℃左右的高温；(2)500℃左右的中温；(3)低于 200℃的低温
42. 硅熔融键合工艺通常在________下进行。
(1)1000℃左右的高温；(2)500℃左右的中温；(3)低于 200℃的低温
43. 在室温下进行的引线键合技术是________。
(1)热压键合；(2)锲形-锲形超声键合；(3)热超声键合
44. 要实现可靠的微系统密封，可以________来完成。
(1)仅仅利用机械方法；(2)利用机电方法；(3)利用物理化学工艺
45. 微壳层可以通过________来制备。
(1)体硅微制造技术；(2)表面微加工技术；(3)LIGA 工艺
46. 微电子和微系统所用到的封装技术是________。
(1)相同的；(2)不同的；(3)可以相互替换的
47. 微系统的封装成本在其整个生产成本中是________。
(1)微不足道的；(2)十分昂贵的；(3)有点昂贵的
48. 微系统封装面临的一个主要挑战是________。
(1)保护核心元件避免接触外部环境；(2)保护核心元件避免其发生解体；(3)正确地连接核心元件

49. 生物 MEMS 器件的封装必须________。
(1)对人体系统的生物攻击不敏感；(2)对体温不敏感；(3)对使用者的误操作不敏感
50. 光学 MEMS 器件的封装要求具有________。
(1)对光的敏感性；(2)足够的光束通路；(3)对光束的反射特性
51. 微阀封装面临的一个严重问题是________。
(1)流体的速度；(2)流体的敏感性；(3)流体的密封性
52. 环氧树脂在高温下应用是________。
(1)适宜的；(2)不适宜的；(3)无关紧要的
53. 一个反应性密封工艺涉及到________。
(1)化学反应；(2)物理处理；(3)机械粘合
54. 真空密封对于包含精细运动部件的 MEMS 器件来说是非常必要的，因为它能够给封装结构中提供________。
(1)清洁的环境；(2)无空气阻力的环境；(3)更好的热隔离
55. 本书中介绍的两种真空密封技术都涉及到利用________来完成封装结构的密封。
(1)真空泵；(2)热处理；(3)抽真空的微加工现场密封技术
56. 三维微系统封装涉及到________的多层堆叠。
(1)微电路；(2)不同功能器件；(3)不同材料
57. 三维封装的主要目标是要获得________。
(1)容积效率；(2)材料效率；(3)功能效率
58. 信号的转换和传输指的是________。
(1)确定系统中使用的转换器；(2)为转换器的选择和设置拟定策略；(3)追踪系统中的转换器
59. 惠斯通电桥是用来测量________的。
(1)电流；(2)电压；(3)电阻
60. 惠斯通电桥可以用来测量________的电阻。
(1)静态；(2)动态；(3)静态和动态
61. 在电阻的测量中，灵敏度的归一化是用来补偿________的。
(1)器件的热膨胀；(2)由于温度引起的计量器具电阻率的变化；(3)计量器具的热膨胀
62. 在电阻的测量中，偏置平衡是用来补偿________的。
(1)器件的热膨胀；(2)由于温度引起的计量器具电阻率的变化；(3)计量器具的热膨胀
63. 硅凝胶是一种针对________应用的芯片保护材料。
(1)高温；(2)中等温度；(3)各种温度
64. 注入形成的压敏电阻沿着与矩形硅薄膜的长边成45°角的方向，它可以用来测量薄膜的________。
(1)法向弯曲应变；(2)切向应力；(3)法向和切向应变
65. 依据当前采用的技术，微系统封装约占其总生产成本的________。
(1)60%；(2)70%；(3)80%
66. 微系统产品的产业化要取得成功，两个关键因素分别是________。
(1)成本和外观；(2)成本和可靠性；(3)可靠性与功能
67. 参数测试结构是一个________。
(1)支持测试的结构；(2)用于测试元件设计参数的微结构；(3)应变测试结构
68. 对微系统产品进行老化测试的目的是________。
(1)测试产品对高温的耐受性；(2)确保产品在高温环境中能够正常工作；(3)确保产品的可靠性
69. 对微系统产品进行自测试的目的是为了________。
(1)确保产品的可靠性；(2)更新产品的性能；(3)确保产品的信誉

70. 微系统在使用过程中的测试是为了确保其在寿命周期内的________。
(1)可靠性；(2)性能更新；(3)不断校准

第二部分：描述题

1. 对于一个典型的显微镜，画出其放大倍数与工作距离之间的关系曲线。
2. 设计一个与图 2.45 所示类似的微型夹钳，要使微型夹钳能够夹持一个长度为 200 μm、质量为 2 mg 的微小圆柱体，确定所需的电极对数目(即叉指对数目)。该夹钳由外加的 25 V 电压驱动，如果考虑长夹钳臂重量的话，计算夹钳臂末端的偏移量，假设整个电极的重量是均匀分布在夹钳臂上的。
3. 估算上一题的夹取操作在干燥环境中产生的粘附力大小，当夹钳释放时判断微小圆柱体能否脱落。
4. 将如图 11.39 所示尺寸的石英梁和硅梁通过阳极键合方法键合在一起，键合温度为 500℃，估算键合之后的残余曲率。考虑到硅梁上可能存在芯片与支撑的石英梁基座之间有相互的对准关系，这种键合梁上存在的过大残余曲率会带来什么样的后果？

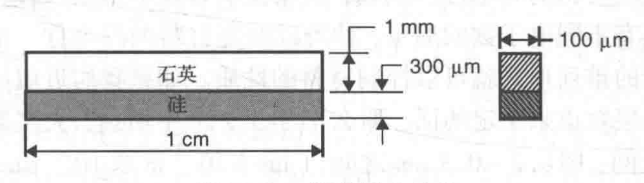


图 11.39　阳极键合的梁

5. 对于例题 4.4 中所描述的情形，采用有限元方法设计出如图 11.36 所示的微型压力传感器芯片所用的间隔层高度 L。画出最大弯曲应力与间隔层高度 L 之间的关系曲线。

第12章　纳米尺度工程简介

12.1　引言

地球上所有的物质，无论是坚硬的金属还是柔软的生物细胞或生物组织，都是由原子构成的。从第3章中给出的元素周期表中可以看出，任意一种元素的物理与化学性质都是由这种元素的原子结构(例如其包含的总电子数)所决定的。我们在第3章中还指出，改变材料的原子排列结构能够改变材料的导电性。例如，就像在半导体中掺杂一样，在一种材料中的原子中掺入另外一种具有不同电子数的原子，就可以改变材料的导电性。由此可见，通过改变原子的结构或者原子的排列形式就可以控制材料的性质。如果我们近似认为原子的大小可以由其电子运动的最外层轨道来决定的话，那么正如3.2节中所述，大多数原子的尺度在 $2\times10^{-10}\sim3\times10^{-10}$ m之间，即0.2~0.3 nm之间(1 nm = 10^{-9} m或 10^{-3} μm)。这个尺度区间决定了新兴的纳米技术的尺度范围。因此我们可以将纳米技术看作是一种能够操纵和控制原子的组分及排列形式的技术，并最终利用这种技术设计、制造出纳米尺度的实体结构，以满足人类的需求。

图12.1中展示了一些介于微米或纳米尺度的物体的尺寸范围。我们可以设想一下，1 nm大约等同于5个中等大小原子并行排列的长度(或者10个并行排列的具有最小尺寸的氢原子的长度)；一串DNA的宽度约为2.5 nm；一个生物细胞的尺寸大约有上千纳米。

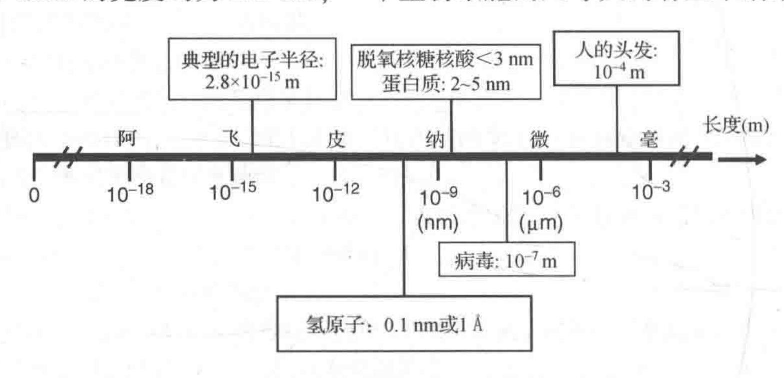


图12.1　介于微米和纳米尺度物体的长度

科学家和工程师们都把通过排列原子来控制材料特性的想法归功于Richard P. Feynman(1918—1988)的一次演讲[Feynman, 1959]，这位富有远见的1965年诺贝尔物理学奖获得者的这个演讲经常被人们引用。Feynman博士在这个演讲中说："如果我们真的能够按照我们的意愿来排列原子的话，那么各种材料的特性将会变得怎么样？我完全相信，如果我们能够在微小尺度上控制物质的排列方式，那么这些物质将会具有无穷多种可能的性质，而且也能够据此来做非常多的事情。"他坚信，如果人类可以按照自己的意愿来控制原子的排列，那么人类就能够制造出非常多的新结构和新材料，就像神奇的生物系统能够做到的那样丰富。Feynman还说："一个生物系统有可能是非常微小的，大多数细胞也都是十分微小的，但是它们却是十分活跃的，它们可以组成各种各样的物质，它们能够行走，也能够摇动，还能够做

很多非常神奇的事情，所有这些都是在非常小的尺度上完成的。此外，它们也能够存储信息。设想一下，如果我们也能够做出一个非常小的东西，它能够做我们想让它做的事情，那么也能够制造出一种可以在这个尺度上运动的物体！”Feynman 的演讲给科学家和工程师们带来了灵感，促使他们更加致力于进一步减小器件和工程系统的尺寸。另一位诺贝尔物理学奖获得者 Horst Stormer 也非常认同纳米技术对于人类所具有的巨大潜在价值，他曾经说过[Amato，1999]：“纳米技术给我们提供了工具……使我们可以充分利用大自然的终极玩具盒——原子和分子，正是它们组成了世界上的万物……并且看上去创造新事物的可能性几乎是无限的。”诺贝尔化学奖获得者 Ronald Hoffmann 将纳米技术视为“一种能够巧妙地控制各种结构的大小，并赋予其复杂特性的方法；它是一种未来的制造方法，从设计上既能够精确地控制结构的组成，又对于环境没有不利的影响”[Amato，1999]。

然而，纳米技术这个词直到 20 世纪 90 年代中期才正式出现。从那之后，全世界众多的科学家和工程师们以及商业界和工业界都对纳米技术产生了浓厚的兴趣，并且对其寄予了前所未有的热情和期待。正如 12.5 节中将要介绍的，纳米技术现在已经在电子、计算与数据存储、材料及制造、健康与医疗、能源与环境、运输以及空间探测等领域获得应用。这项新技术所带来的收益也是在快速增长的，已经从 2001 年的 5 千万美元增长到 2003 年的 265 亿美元。根据美国国家自然科学基金会的预测，到 2015 年，由纳米技术产生的年收入将达到 1 万亿美元[“Nano Technology”，2002]。正是这个巨大的市场潜力促使发达国家的政府在过去十年里投入了数十亿美元，用以支撑纳米技术的研究和发展。

本章内容将涵盖纳米技术的各个工程领域，具体内容安排如下：首先，我们将介绍微米技术与纳米技术之间的重要区别，以及纳米尺度器件与元件原子级制造的基本原理。在此之后，将简要介绍几种基本的纳米尺度产品的制造技术及其应用，其中包括纳米颗粒、纳米线和纳米管。接下来，我们将回顾并总结纳米尺度固体力学和热流体力学中用来进行工程设计与分析的各种现有工具的基本原理，以及将它们应用在纳米尺度工程设计时所需要做的修正。本章还总结了科学家和工程师们在设计和制造纳米器件与系统时所面临的困难和挑战，以及纳米技术对人类社会、经济以及人文环境所带来的主要影响。

12.2　微米技术与纳米技术

在技术界存在一种广泛的观点，即认为纳米技术(NanoTechnology，简称 NT)是从制造微机电系统(MEMS)的微系统技术(MicroSystem Technology，简称 MST)自然演化而来的。也有一些人认为纳米技术仅仅是微系统技术进一步缩小尺寸而已。显然，这些观点都是不正确的。如图 12.2 所示，尽管 MST 和 NT 都以微型化为共同目标，但是它们之间还是有本质区别的。对于尺度介于 1 nm ~ 1 mm 之间的微器件来说，MST 技术可以看作是一种自顶向下的设计与制造方法，而 NT 技术则是一种自底向上的设计与制造方法。

表 12.1 中还列出了 MST 技术与 NT 技术的其他区别。尽管许多发达国家的政府在该领域的研究和发展中已经投入了大量的人力和充足的资金，但是要充分发挥纳米技术的潜力仍然有很长的路要走，还需要有更多的产业化资金投入。要能够制造出实用、可靠的纳米尺度机电系统(简称为 NEMS)，就必须在相关的纳米驱动材料上取得重大的突破，例如纳米尺度的压电材料。

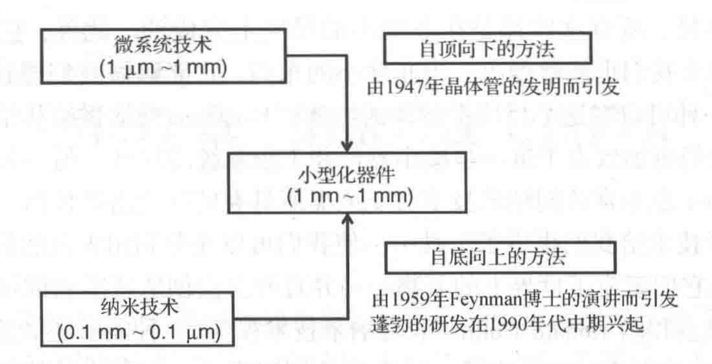


图 12.2 微系统技术与纳米技术

表 12.1 MST 技术与 NT 技术的比较

微系统技术	纳米技术
自顶向下的微型化方法	自底向上的微型化方法
可以微型化到微米或亚微米尺度	可以微型化到原子尺寸(亚纳米)或纳米尺度
基于固态物理	基于量子物理和量子力学原理
由 IC 制造技术发展演变过来	尚不确定
对于特定的电子机械功能,已经有确定的技术	尚待开发
已经有完善的制造技术	仅有初步的制造技术(尚不成熟)
已经建立了完善的生产技术	仅有少数几种产品的生产技术
市场上已经有经过验证的器件和工程系统	仅限于少数几种材料所形成的纳米点、纳米线和纳米管
不少产品已经成功实现了商业化	只有一些特殊应用的材料和有限数量的生物医疗产品实现了商业化

12.3 纳米制造技术的基本原理

我们可以将组成物质的原子和分子看成是构建纳米尺度器件和元件的“积木块”。这样一来,制造这些元件的过程则主要包括3个步骤:(1)原子或分子的分离;(2)将分离出的自由原子或分子进行组装;(3)自由的原子或分子之间重新实现价键连接。

第一步:分离原子或分子。有很多种技术可以用来从基础材料中分离出所需要的原子或分子,这些技术包括机械方法、电子机械方法和电化学方法等,我们在下面的段落中将分别予以介绍。

*借助机械方法实现原子的分离:*原子力显微镜(AFM)最初是由IBM公司的Gerd Binnig和Christoph Gerber以及斯坦福大学的Calvin Quate于1985年研制出来的。该显微镜具有原子级的分辨率,目前已经被广泛应用于测量固体材料的表面形貌。AFM是一个特殊设计的结构,它包含一个带有硬质尖端的悬臂梁,该硬质尖端一般是由金刚石制成的,它固定在悬臂梁的自由端,悬臂梁结构连接到一个支架上,该支架能够控制悬臂梁在待测固体材料的表面做扫描运动,如图12.3所示。悬臂梁的硬质尖端可以与待测表面直接接触,也可以与待测表面保持微小的间隙。待测表面上任意的不规则特性都会导致悬臂梁结构发生偏转,从而引起固定在扫描悬臂梁结构上表面的反射镜发生倾斜。利用反射光检测器可以将这个由尖端偏转

而引起的倾斜量检测出来，如图 12.3 所示。检测到的信号与表面的不规则特性有关，因此可以在纳米尺度上反映固体材料的表面形貌。AFM 还可以用来进行机械“切削”，因此它也能够从柔软材料的表面分离出所需的原子。

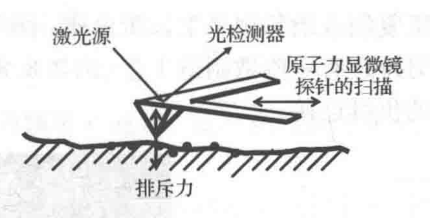


图 12.3 原子力显微镜的扫描过程

利用扫描隧道显微镜实现原子的分离：扫描隧道显微镜(STM)是由 IBM 公司的 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 在 1981 年发明出来的。这两位科学家也正是因为这个重要的发明而获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖。如图 12.4 所示，将一个导电探针放置在一个粗糙固体材料的表面上方，并与表面之间保持一个狭小的间隙。当我们在固体表面与探针之间施加一个电场时，电子就会跳过(运动)这个狭小的间隙，形成一个隧道。因此隧穿形成的电流大小与外加电压以及间隙的大小成一定的比例关系。当探针在固体材料表面扫描时，通过不断调整间隙 d 的大小使得隧穿电流保持恒定，就可以获得物质表面的完整形貌。通过调节使得针尖处的局部电流急剧增大，STM 也可以用来断开物质表面处的原子键，因此它也可以从固体材料的表面附近分离出特定的原子。

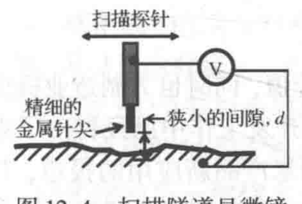


图 12.4 扫描隧道显微镜

利用电化学方法实现原子的分离：通过材料的蒸发来实现微型化的设想最早是 Feynman 在 1959 年的一次著名演讲中提出的。的确，正如我们在第 8 章中所了解到的，有很多种方法可以用来离化物质，并使这些带电的原子能够自由运动。8.9.2 节中介绍的等离子体刻蚀技术则是另外一种从物质表面分离出自由原子的方法。这些方法已经被广泛应用于许多纳米产品的制造中，详细情况将在 12.4 节中介绍。

第二步：对游离的自由原子或分子进行组装。目前已经有很多种方法可以用来组装那些在第一步中从不同物质上分离出来的自由原子或分子。将这些游离的原子“推进”到待组装的位置，既可以采用各种这些机械方法，例如利用 AFM 引导的纳米装配系统(简称为 AGN)来完成，也可以在一些特殊的受控环境中，例如在一个受控的温度场或电磁场中来完成。图 12.5 中展示了 IBM 公司如何使用 STM 对游离的金原子进行重新组装排列的过程。左上角照片显示的是游离的原子。使用 STM 将每一个游离原子依次引导到待排列的位置，每次引导一个原子，最终排列成“IBM”公司的名字，如右下角照片所示。

为了实现工业化的大规模生产，人们已经开发出了各种生物化学工艺来组装这些游离的原子和分子。例如，自然界中各种生物细胞的自组装技术和复制技术，就为我们开发用于纳米产品大规模生产的纳米组装技术提供了一个非常好的基础，详细情况将在 12.11.2 节介绍。

第三步：自由原子或分子之间重新实现价键连接。人们已经开发出了多种用于促使游离的原子和分子重新实现价键连接的合成工艺。机械合成(例如，在高温高真空中使得原子发生汽化)以及后续的冷凝处理技术已经在纳米尺度产品的制造中获得应用。除此之外，化学合成方法也是合成自由原子与分子的一个非常有前景的技术。其中，化学气相淀积技术包括扩散和化学反应，它可以促使原子和分子实现高质量的价键连接。生物化学合成方法能够人

工复制或组装用来生长蛋白质、酶和抗体的天然分子机器，是近几年非常活跃的研究领域。另外还有一些微制造工艺(例如8.8节中介绍的外延生长技术)也可以用来实现原子或分子的价键连接。

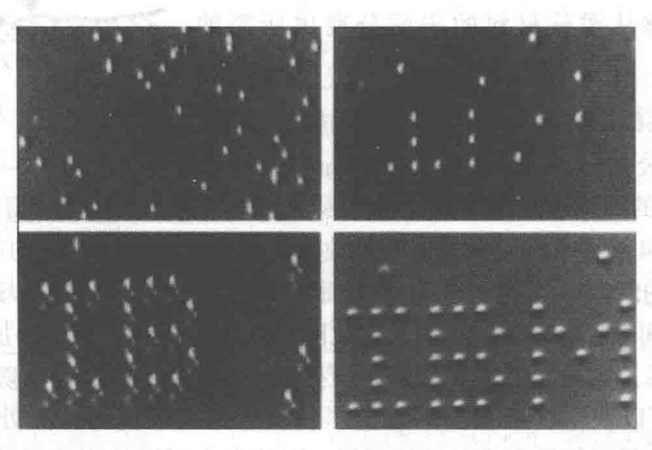


图12.5 采用STM对游离的原子进行组装

12.4 纳米产品

正如12.1节中所提到的，纳米技术不但具有非常巨大的潜在价值，同时也为制造业提供了很好的机遇。为了利用纳米技术制造出新的产品，人们在研究与开发工作中已经付出了艰辛的努力。最近几年，科学界和工业界都有许多关于纳米技术与纳米产品新应用的报道，其中不少产品已经在市场上获得了成功。由于篇幅所限，在本章中不可能对所有这些产品做一一介绍，仅介绍几种基本的纳米结构，这些基本结构可以看作是现在和未来构建各种纳米产品的"积木块"。

巴基球：这是第一个人造的纳米结构，它是由1985年诺贝尔化学奖的三位获得者Harry Kroto、Richard Smalley以及Robert Curl共同发现的["Nano Technology", 2002]。这些球是在极高温条件下，使用大功率激光器在惰性气体环境中加热蒸发石墨而提取出来的。巴基球这个名字是以一位美国建筑设计大师Richard Buckminster Fuller(1895—1983)的名字来命名的，这是因为巴基球表面碳原子的六角形价键连接方式(如图12.6所示)启发了该建筑师为1967年蒙特利尔博览会设计的球形圆顶房屋。一个巴基球由60个碳原子(C_{60})组成，是一个外形似足球、直径为0.7 nm的空心笼子结构。该结构非常稳定，并且能够承受非常高的温度和压力。研究者已经做了大量的努力，试图将更小的分子嵌入到球的内部或者将其他分子连接到球的外表面。

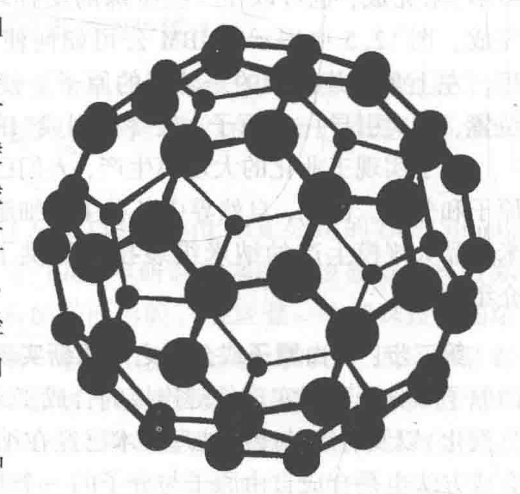


图12.6 巴基球

纳米颗粒：纳米颗粒，也称为量子点，是一种纳米尺度的微观颗粒，其在三维尺度上至少有一个

维度的尺寸小于 100 nm(参见“维基百科”)。制造纳米颗粒的两种主要方法是:(1)研磨;(2)高温分解。

1. **研磨**:这种方法利用球磨机直接将材料研磨成小的颗粒。通常,微小颗粒尺寸的进一步减小是通过多级研磨逐渐实现的。
2. **高温分解**:这种方法实际上是一个高温汽化蒸发的过程。首先在高温下使材料汽化蒸发,然后再通过冷凝处理将其变成微小的颗粒。材料的高温汽化蒸发可以使用第 3 章中介绍的高压直流电场或射频电源,它们产生的热等离子体能够形成高达 10 000 K 的温度,可以使物质蒸发并形成纳米尺度的精细粉末。这些纳米尺度的微细颗粒是在冷却之后在等离子体腔外产生的。

与其对应的体材料相比,纳米颗粒通常都具有一些非常独特的性质,并且这些性质还与颗粒的尺寸有关。纳米颗粒可能比对应的体材料更加坚硬、牢固,同时也具有更好的导电性和导热性。除此之外,纳米颗粒还具有一个独特的性质,就是它的颜色与其尺寸有关。例如,大小为 120 nm 的银颗粒呈浅红色,当尺寸缩小到 80 nm 时,就会转变成淡蓝色,尺寸缩小到 40 nm 时,又会变成深蓝色。而金的纳米颗粒则从 100 nm 时的橘黄色逐渐变成 50 nm 时的橄榄绿色。

纳米线:纳米线的典型特征是其横向尺寸在 1 nm 的量级,而其长度方向的尺寸则没有限制,可以长达数毫米。纳米线可以由金属(例如 Ni 和 Au)、半导体(例如 Si 和 GaN)以及化合物(例如 SiO_2)等材料制成。

纳米线的制造方法有很多种。工业上广泛采用的是一种称为气-液-固(VLS)相的合成工艺。该方法用到一种由气态原材料形成的微小颗粒,这种气态原材料暴露在一种由液态金属纳米簇制成的催化剂周围,该催化剂能够促使上述气态原材料在其表面聚合并生长。汽化后的原材料颗粒一旦达到超饱和状态,就会在纳米簇上凝固。然后,这些原材料颗粒就会从纳米簇上向外生长,形成纳米线。图 12.7 展示的是在蓝宝石晶圆片上以整齐阵列方式垂直生长的氧化锌晶体纳米线[Yarris, 2003]。这些纳米线的平均直径为 2.5 nm,其长度在 2 ~ 10 μm 之间。

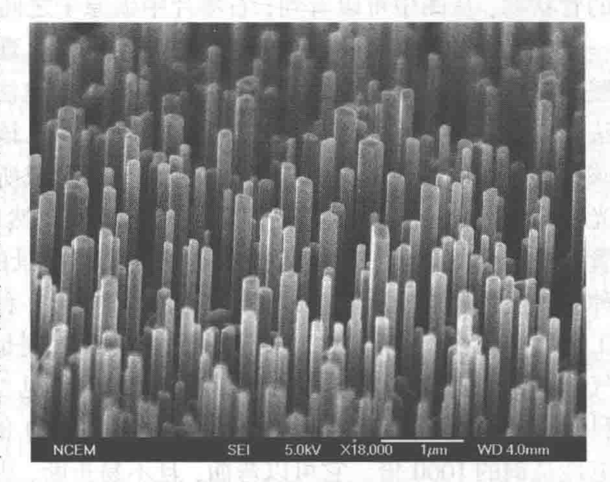


图 12.7　氧化锌晶体纳米线(经 Peidong Yang 许可使用)

纳米线可以由导体、半导体或电介质的体材料来形成。它们是分子电子学和纳电子学中的重要组成单元,能够用作电路的互连导线和纳米尺度晶体管的栅电极。一般说来,纳米线的电导率要比相应的体材料电导率低。纳米线的电导率不仅可以通过其表面状态来控制,而且更为重要的是,利用第 3 章中介绍的掺杂工艺也可以控制很多纳米线的电导率。

纳米管:通过对巴基球的制备研究,人们尝试将新发现的纯碳 C_{60} 的应用扩展到其他纳

米结构，即一种管状结构，称为纳米管。这些纳米管的直径可以有数纳米，而管壁的厚度仅有1 nm左右。纳米管的长度也没有限制，可以达到100 μm甚至毫米量级。从理论上说，很多种不同的体材料都可以制成纳米管，这一点与纳米线类似。但是由于巴基球的成功研制，使得碳纳米管(CNT)成为目前纳米管的一种典型形式。因此，很多人也把碳纳米管称为巴基管。

首例人工合成的碳纳米管是在1991年报道的[Iijima, 1991]。研究人员将约为一个原子厚度的石墨片卷曲成管状，由此形成了无缝的CNT，如图12.8所示。

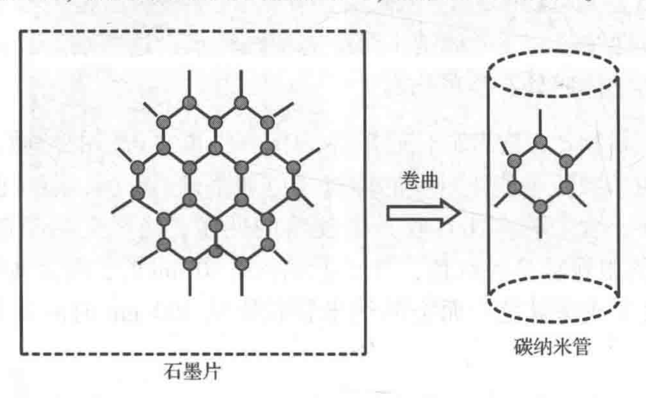


图12.8　碳纳米管的形成

图12.8展示了将一片石墨(它是纯净碳的三种存在形式之一)卷曲成一个直径为几纳米的管状物，从图中可以看到，石墨片中碳原子之间的价键连接呈六角形结构。与制备巴基球一样，这个工艺也需要极高的温度和真空条件。现在已经有几种技术可以用来大批量生产单壁的CNT。工业上用到的有3种技术：电弧放电法、激光消融法以及受催化的化学气相淀积法。电弧放电技术主要应用在发展的初期阶段，该方法使用电弧放电技术产生出可以促使体碳材料蒸发所需要的高温，并合成自由原子形成所需的形状。激光消融技术则是利用脉冲激光在高温腔体中使得石墨靶材发生汽化蒸发。然后就会在冷却的纳米线模具表面形成纳米管。受催化的化学气相淀积技术是一种最有前景的CNT大批量生产技术。这项技术利用两种载气发生反应，从而在衬底上生长出CNT，一种载气是工艺气体(例如NH_3、N_2、H_2等)，另一种载气则是含碳的气体(例如乙炔、乙烯、乙醇、甲烷等)[参见“维基百科”]。平均而言，碳纳米管的强度是钢铁的20倍，其导电性是铜的1000倍。它可以弯曲，且不易折断，因此它是制备纳米尺度器件的一种非常优秀的材料。

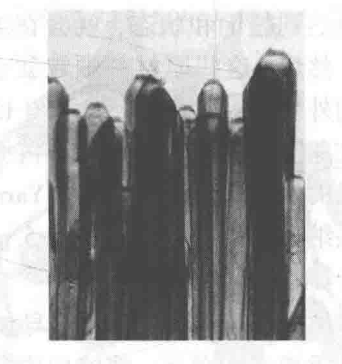


图12.9　由GaN材料制备的纳米管
(经Peidong Yang许可使用)

图12.9所示是采用外延铸造技术制备的氮化镓(GaN)纳米管[Yarris, 2003]。首先利用图12.7所示的氧化锌纳米线作为模具，采用化学气相淀积工艺在纳米线表面生长出汽化的氮化镓原子；然后通过加热将氧化锌内芯蒸发掉，从而形成氮化镓纳米管。这种方法制备的纳米管直径在30～200 nm之间，其管壁厚度在5～50 nm之间。这种纳米管是由单晶形成的，它是透明的并且具有活跃的电学特性和光学特性。

12.5 纳米产品的应用

从 12.4 节中我们了解到，有很多种材料可以用来制作不同尺寸的纳米颗粒、纳米线以及纳米管。这些纳米产品具有一个令人惊奇的特点，即组成这些纳米产品的材料基本性质随着其尺寸、形状以及组分的改变而变化，这个特点是其对应的体材料完全不具有的。这些与尺寸相关的性质包括：

- 机械强度(例如最大拉伸长度、杨氏模量)
- 电学性质(例如电阻率)
- 化学性质(例如发生化学反应的活性)
- 光学性质(例如对光的反应水平)
- 热物理性质(例如热导率、热扩散系数和热膨胀系数)
- 熔点和溶解度
- 磁学性质
- 催化性质(例如增强化学反应的能力)
- 液体的黏度与表面张力

纳米产品所特有的这种与尺寸相关的材料特性，为各种新的应用提供了大量的机会。很多人认为，纳米产品的这个特点，是纳米技术对科学界和工业界产生深远影响的主要原因。下面介绍纳米产品在生物医学、分子电子学、能源、环境以及工业产品中的应用。

生物医学：纳米颗粒对生物材料是非常敏感的。因此，它们不但可以用来检验受损或死亡的细胞，从而检测出疾病，而且还可以用在一些复杂疾病的早期诊断中，例如老年痴呆症等。纳米颗粒还可以用作药物的载体从而实现靶向药物的定向输送。这种载体上装有能够检测出疾病组织的纳米传感器，在检测到疾病组织之后，能够黏附在疾病组织上并释放出所需的药物。纳米颗粒还能够进入到受损细胞中，然后释放出能够让细胞自我分解或自我修复并恢复正常功能的酶。这种定向的药物输运对于治疗癌症来说是非常有价值的，因为治疗只针对癌细胞而不会影响到周围健康的细胞组织。纳米颗粒的颜色会随着其尺寸的变化而改变，这个独特的性质使得纳米颗粒成为一些主要疾病早期检测过程中理想的生物标签或生物条码候选者。它们能够在极低的数目下检测出多种由核酸或蛋白质组成的生物标签。这些对于医学诊断都是至关重要的。这些生物标签还可以指示神经退行性疾病的发作、病毒感染或环境中存在的有毒物质或致命病原体等。纳米颗粒所具有的高灵敏度检测对于疾病的早期诊断、跟踪疾病的治疗效果与复发情况、DNA 测序、血液及食品的供应筛选等应用来说是非常重要的。由于其尺寸微小并且材料性质可控，纳米颗粒还可以用作修复皮肤、软骨和骨骼的基本原材料。

在制药工业中，扩散工艺是药物研发和生产中一项重要的基本工艺。由于纳米颗粒具有极高的表面积与体积比，因此这使其在扩散工艺中具有显著的优势。

分子电子学：纳米线就是纳米尺度电路的基本组成单元，它们也可以用在简单的开关电路中。有人提出了利用碳纳米管来制作新型的纳米尺度存储器件。将这些微小的碳管相互并联或者通过结相连接，电流流过这些碳纳米管时会改变其电学性质，这样就可以在纳米尺度

的数据存储系统中起到永久存储信息的作用。也有人提出了一种新型的纳米尺度晶体管，该晶体管采用导电分子来连接其栅和源、漏电极。外加电压能够改变这些分子的电学性质，因此可以调制晶体管中流过的电流。

碳纳米管的热导率较高，因此它是纳米尺度电子学中用作热界面材料的理想候选者。在室温下，实测一个多壁碳纳米管的热导率为3000 W/m·K，大约是铜热导率的8倍，或者是硅热导率的20倍[Kim等人，2001；Yu等人，2005]。因此在分子电子学中，碳纳米管可以非常有效地耗散掉纳米尺度电路中电阻上产生的热量。

在过去的十余年里，自旋电子学的概念吸引了众多科学家和工程师们的密切关注，因为有可能开发出基于电子自旋特性的数据存储系统。电子的自旋具有两种形式：向上或向下。因此可以把电子的自旋看作是一个二进制码，这为基于量子力学原理的量子计算提供了广阔的前景。

能源：在现代社会中，能源是维持人类高质量生活的必要条件。纳米技术和纳米产品已经对各种形式的能源生产带来了重大的影响。读者如果想了解这个论题的详细情况，可以参阅一份很好的参考资料[Gillett，2002]。下面将介绍纳米技术在几种能源中的应用：

1. **燃料电池：**目前燃料电池已经能够直接将化学能转化成电能。纳米技术的一个主要应用就是能够为燃料电池提供催化剂，从而增强氢气和氧气在燃料电池中阳极和阴极处的电离。具有可控电化学特性的纳米颗粒可以用来制造这样的催化剂。
2. **蓄电池：**蓄电池是唯一可以用来存储电能的设备。有了纳米技术，人们可以设计并制造出采用碳纳米管的蓄电池阴极和阳极。这种新型的阴极和阳极能够显著增大电能存入蓄电池中的数量和速度，同时也大大缩短蓄电池充电的时间。纳米技术的另一项应用是控制锂离子电池中锂的晶格结构，从而改善电池的存储效率。
3. **太阳能电池：**太阳能光伏电池(PV)能将太阳光中的能量直接转化成电能。我们在本书的2.2.4节中已经介绍了太阳能电池的基本工作原理。最近几年里，由于硅太阳能电池的能量转化效率得到了显著提高，市场上对这类电池的需求也明显增加。通过增加嵌入在硅晶圆片中的电极密度，可以俘获所有流过P型和N型晶圆片的电子，从而显著提高硅太阳能电池的能量转化效率。但是由于电极同时也会占用接收光照的面积，因此为了保证一定的光照面积，电极的数目也是受到限制的。利用高电导率的纳米线可以在使用最小物理空间的前提下，使得收集到的由光电转换产生的自由电子数达到最多。由于太阳能电池中的光电转换过程是一种表面效应，因此利用纳米制造技术生产的超薄晶圆片还可以使昂贵的硅晶圆片制造成本降到最低。
4. **原位提取沥青：**全世界有储量巨大的油砂沉淀。从这些沉淀中提取沥青的一种方法是向沉淀中注入蒸汽，驱使受热疏松的沥青流入到收集井中。这种原位提取沥青方法的成本虽然高于传统露天开采的方法，但是却利于环境的可持续发展。该方法的主要困难在于如何控制沥青的流动，纳米技术可以帮助解决这个困难。与纳米颗粒用作生物标签的原理类似，将纳米颗粒随着蒸汽一起注入到油砂沉淀中，这些颗粒可以追踪受热分解的沥青流，从而帮助工程师们确定在何时、何地注入额外的蒸汽，从而提高生产效率。
5. **太阳能电池与燃料电池的结合：**已经有研究尝试将太阳能电池与燃料电池相结合，组

成一种新型可再生的能源生产系统。该系统中的两种电池都能发挥其自身的功能。例如，当太阳能电池输出能量时，燃料电池逆向工作，收集多余的能量，并转化成氢气储存起来。在夜晚或没有阳光时，太阳能电池板不再输出能量，燃料电池将正向工作，将存储的氢气转化成电能。

环境：纳米颗粒可以吸收、俘获或者分解污染物，也能减少传统燃料的污染，提高冷却剂的效率。人们正在尝试将纳米管应用到传感器中，以检测环境中的有毒气体。例如，氧化锌薄膜暴露在紫外线照射下时能够发出绿光，而当周围存在有毒的化学物质时，例如存在氯化苯或多氯苯酚时，薄膜的颜色将会变得暗淡。污染物还可以与被紫外线照射的薄膜发生反应，并分解成无害的化学物质。

此外，纳米颗粒还能够去除多种常见污染物的毒性。纳米复合材料还能够吸收汞，并且在加热或真空处理条件下将吸收的汞释放出来。因此，这种材料是回收汞的有效工具。

其他应用：我们从12.4节中得知，纳米颗粒、纳米线和纳米管的特性可以通过控制其尺寸的大小来进行控制。利用这个特点，通过精确控制某些特定材料纳米颗粒的大小，已经制成了一些用于智能或耐久结构表面的特殊颜料或涂层，并成功地实现了商业化。这些表面能够响应环境的变化或者起到一层非常坚固的表面保护作用。由纳米颗粒制造出的超级牢固和坚韧的颜料或涂覆材料，还可以用于建筑设施或汽车底盘的外表面。

除了分子电子学之外，纳米线在光电子学和纳电子机械器件中也获得了应用，它还能够用于制造一些具有特殊用途的纳米复合物，也可以用作纳米尺度传感器和致动器的引线。

碳纳米管在纳米结构中具有非常重要的用途，原因如下：

1. 强度极高。其拉伸强度超过60 GPa，而在表7.3中给出的硅的屈服强度只有1 GPa，由碳纳米管组成的复合材料强度可以达到138 GPa，即20×10^6 psi。这种超高强度的材料可以极大地减小各种机械结构的重量，未来它有可能使人们梦想的仅与一辆家用汽车重量相当的超轻型宇宙飞船成为现实。
2. 高电导率。通过控制碳纳米管的电阻率，可以得到非常高的电导率，加之其微小的尺寸，这使得纳米管成为纳米电路以及纳米逻辑门中纳米尺度继电器和开关的理想材料。
3. 采用如图12.9所示的GaN等其他材料制备的纳米管已经被应用于化学传感器和纳米流体器件中，包括用于生物医学分析的纳米电泳系统中。

12.6 量子物理

许多科学家和工程师都认为，随着人们持续不断地发展纳米技术，器件和工程系统的微型化将逐渐达到极限，就像Feynman半个世纪前所预测的那样[Feynman，1959]。我们在纳米技术中所讨论的物质尺寸都在纳米尺度，它恰好落在原子的尺度范围内。因此我们可以预计在纳米尺度，原子效应将会对各种元器件的设计和制造产生越来越大的影响。例如，在这些系统的力学设计中，范德华力的影响就已经不能再被忽略了。根据宏观物质得出的物理定

律和理论中没有考虑这些原子效应的影响，已经不再适用。为了使其能够继续成立，必须对其做重要的修正，以计入原子效应的影响。

在亚微米和纳米尺度的固体中，热作为一种主要的能量传输机制，是除了范德华力之外的另一个影响纳米系统工程设计的关键原子效应。这种原子效应可以通过量子物理理论来很好地加以描述。

一个量子代表任何系统能够获得或者失去的最少能量。这种最少能量的交换发生在原子尺度。1900年左右，麦克斯韦·普朗克(Maxwell Planck，1858—1947)在推导热辐射公式时做出了能量是量子化的假设。这个量子化的概念导致了物理学中的一个重要分支——量子物理的诞生。普朗克假设任何物质中的原子在获得了能量之后，都会在其晶格中的平衡位置附近来回做往复振动(参见图3.5)。这种振动向外辐射的能量可以由一个简单的公式来表示：

$$E = nh\nu \tag{12.1}$$

式中，n 为整数，$n=1,2,3,\cdots$；h 为普朗克常数，$h=6.626\ 076\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$；$\nu$ 为振荡频率，其单位是 $\mathrm{s^{-1}}$。

式(12.1)中这个与原子振动相关的能量称为一个声子，声子的频率极高(一般在 10^{13} Hz的量级)，通常以声学波的形式在物质中传播。

阿尔伯特·爱因斯坦在1905年提出了光子理论，他假设光就像是由能量集聚而成的粒子束，他称这种粒子为光子。一个光子的能量可以表示为：

$$E = h\nu \tag{12.2}$$

式中，ν 为光子的频率。

利用爱因斯坦的光子理论，我们可以解释很多经典波动理论无法解释的光学现象，其中一个实例就是第2章中介绍过的光电效应。

声子和光子都是能量的载体。尽管在量子物理中将它们当作“粒子”来处理，但是它们都没有质量。一个熟悉的现象可以解释这个观点。当使用电能来加热一根金属棒时，金属棒将会发光。施加到金属棒上的电能越多，金属棒发出的光就越明亮。爱因斯坦的光子理论假设光是由光子所荷载的，因此更明亮的光说明光子具有更高的能量。正是因为光子没有质量，才使得灼热的金属棒所发射的光子给我们的感觉仅仅是热，而不是力。

由于声子和光子是能量的载体，我们可以预计它们在原子尺度物质的热传输中将起到非常重要的作用。考虑了能量载体量子化所带来的影响之后，我们将在12.9节中介绍有关亚微米和纳米尺度固体中热传输过程的数学模型。

12.7 分子动力学

我们从3.4节中可知，物质在外力或能量作用下可以变成不同的形状。形状的变化对应于物质中原子或分子间相对位置的变化。在自然状态下，任何物质中的原子和分子[参见图12.10(a)]都是通过化学键[参见图12.10(b)和(c)]结合在一起的。这些化学键具有弹性，能够在外力和能量的作用下伸长和压缩。为了改变物质的形状，必须要施加力和能量来克服原子或分子之间存在的这种弹性结合力或分子间力[如图12.10(c)所示]。

如图3.6所示，随着原子对或分子对之间相对距离的变化，分子间力的极性也可能会发生变化，即从吸引力转变为排斥力，或者从排斥力转变为吸引力。对于宏观尺寸的

物质而言，其中包含的原子对数目是个天文数字，因此在大量原子或分子的统计平均下，分子力极性的影响可以忽略不计。然而，对于纳米尺度的物质而言，这个影响就不能忽略了。

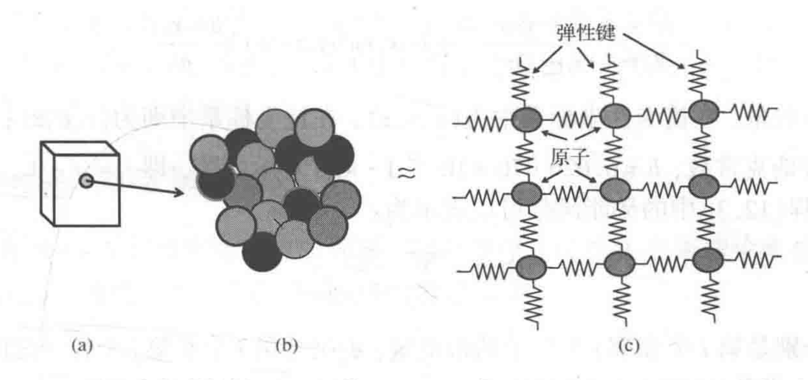


图 12.10 原子中的弹性键：(a)固体平面；(b)集聚的原子；(c)原子之间的弹性键

正如12.5节中所述，麦克斯韦·普朗克曾经假设，物质中的原子在获得外部能量或力的作用之后，会在其晶格中的平衡位置附近来回做往复振动。因此我们可以用弹簧代替原子之间的化学键来模拟普朗克的这个假设，如图12.10(c)所示。原子的振动可以被抽象成一个包含质量和弹簧的机械振动，参照4.3节中的分析可知，任何原子所受到的任何扰动都可以看作是上述机械振动的初始条件。上述分析预示了一个在纳米尺度工程分析中的重要事实，即无论原子受到的扰动是静态的还是时变的，对原子物理特性的处理都应该是动态的。分子动力学是一门阐述纳米尺度物质中原子运动规律的学科。

我们来分析图12.11(a)所示处在同一平面内原子阵列中一个原子的动态运动，这些原子通过弹性键连接在一起，如图中的虚线所示。在某一瞬间，对阵列中央的原子(图中呈灰色的原子)施加一个偏移向量，那么在t_1时刻，原子可能运动到图12.11(b)所示的位置。假设周围原子的运动可以忽略，那么一部分与该原子连接的弹性键将被拉伸，而另一部分则被压缩。弹性键形变的恢复会使原子回到最初的平衡位置并且向相反的方向运动，如图12.11(c)所示。我们很容易设想，原子这样的来回往复运动(即振动)将会持续一段时间，直到与之相关的能量被完全耗尽为止。

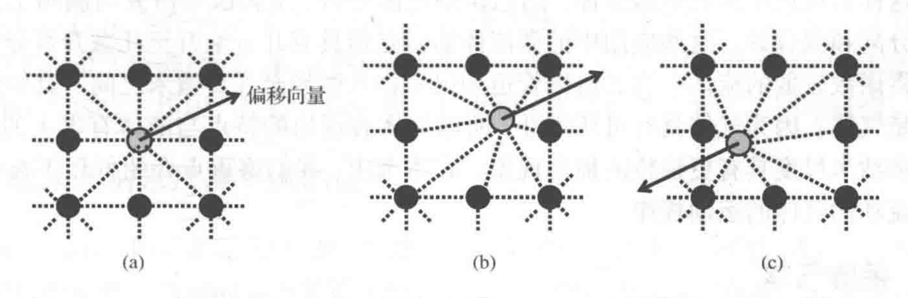


图 12.11 一个原子的振动：(a)初始平衡位置；(b)t_1时刻位置；(c)t_2时刻位置

能够描述上述原子动态运动特性的基本方程是薛定谔方程，该方程是薛定谔在1926年从非相对论量子力学中推导得到的。由于篇幅所限，我们仅介绍该方程的形式以及方程中涉及到的变量和参数的物理含义。关于该方程更详细的描述及其在纳米尺度工程设计中的求解方法，有一本非常优秀的参考书可供读者参阅[Drexler，1992]。

通过求解方程(12.3)，可以求出位于 n 个质量分别为 m_0，m_1，m_2，…，m_{n-1} 的带电粒子(即图12.11中的其他原子)力场中的一个带电粒子(例如，一个离化原子)的位置坐标 $\phi(\mathbf{r},t)$[即图12.11(a)中灰色的原子]：

$$-\frac{h^2}{2}\sum_j \frac{1}{m_j}\frac{\partial^2\phi(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{r}_j^2}+U(\mathbf{r},t)\phi(\mathbf{r},t)=\mathrm{i}h\frac{\partial\phi(\mathbf{r},t)}{\partial t} \tag{12.3}$$

式中，$\mathbf{r}$ 是位置矢量，在笛卡儿坐标系中为 (x,y,z)，在柱坐标系中则为 (r,θ,z)；$U(\mathbf{r},t)$ 是势能函数；h 是普朗克常数，$h=6.626\,076\times10^{-34}$ J·s；i 表示虚数，即 $\mathrm{i}=\sqrt{-1}$。

薛定谔方程(12.3)中的势能函数可以表示为：

$$U(\mathbf{r})=\sum_{i<j}\frac{q_i q_j}{4\pi\varepsilon_0 d_{ij}} \tag{12.4}$$

式中，q_i 和 q_j 分别是第 i 个和第 j 个粒子的带电量；d_{ij} 则是第 i 个和第 j 个粒子之间的距离；ε_0 为真空中的介电常数。

借助一个确定性模型，可以通过薛定谔方程求解一个特定原子在外力作用下的瞬时位置，再根据其瞬时位置对时间的一阶导数和二阶导数又可以分别求得该原子的瞬时速度和瞬时加速度。这个方程的求解过程并不是那么一目了然，因为很难确定分子之间的瞬时距离 d_{ij}，这就使得考虑式(12.4)中势能函数的影响变得十分困难。式(12.1)所表示的电中性原子的势能与式(10.9)所表示的形变固体的势能有关。该公式的计算需要知道特定材料中分子间力的信息，如图3.6所示，这种分子间力会随着分子间距离的改变而变化。迄今为止，这些相关的信息并未被完全掌握。因此，在纳米尺度，利用薛定谔方程来求解固体的动态特性还是不现实的。

12.8 亚微米与纳米尺度下的流体流动

在第2章中，我们曾经预测，包括微型生物医学仪器与设备以及生物传感器在内的生物微机电系统(bioMEMS)将成为继压力传感器之后下一个被广泛应用的微机电系统(MEMS)产品。的确，在生物技术和制药工业中，经常有关于新的生物微机电系统新产品研发进展的报道。许多这样的应用中涉及到微流体，例如在染色体分析、生物医学研究与制药工艺过程中微成分的分离和混合等。这些应用中的微流体通常是指具有几百纳升至几微升每分钟的低体积流速且雷诺数较低的流体。这类流体管道的尺寸在几微米至几百微米之间。其中涉及到的多数流体是气体。因为气体具有可压缩性，所以气体表现出的特点与液体有很大的不同，并且在微米和纳米尺度具有更独特的稀薄现象。在本节中，我们将重点介绍低压下在极小的空间内低速流动的气体的运动规律。

12.8.1 稀薄气体

Merriam Webster 字典[Mish，1995]中将稀薄(rarefaction)一词解释为：“在压缩波的作用下，媒介所处压力最低的状态，或者媒介中压力最低的区域。”以上陈述中的媒介就是指处于最低压力状态的某种气体。

正如我们在第5章的开头曾经提到，流体是由分子集聚在一起形成的，气体中相邻分子之间的距离要远大于液体中相邻分子之间的距离。即便是在自然状态下，气体分子也能够在

空间中随机运动，并且相互之间或与浸入其中的物体或容器表面不断发生碰撞。这种现象与随机运动的颗粒非常类似[Patterson，1971]。对于给定状态下的特定气体，存在一个平均自由程(MFP)长度λ，它是气体分子在不与任何物体发生碰撞的前提下所能运动的平均长度。对于处在大气状态下的大多数气体来说，$\lambda=65$ nm 被认为是其平均自由程长度的一个很好的估计值[Beskok 和 Karniadakis，1999]。液体中也有平均自由程的概念，一般说来，液体的平均自由程大约是其分子尺寸的两倍。

12.8.2 Knudsen 数与 Mach 数

正如我们在5.2～5.6节中所规定的那样，能否使用连续流体力学理论来描述流体的流动取决于其 Knudsen 数的大小，这个 Knudsen 数的定义为：

$$\mathrm{Kn}=\frac{\lambda}{L} \tag{12.5}$$

式中，L 是特征尺度，其数值的选取与流动范围内的密度梯度、速度及温度有关。

取平均自由程 $\lambda\approx65$ nm，可以很方便地计算出例题5.5中液体流动的 Knudsen 数非常小，仅为1.3×10^{-4}；而另一方面，在一个计算机的数据存储系统中，悬于碟片上方50 nm 处的读/写头与快速旋转的碟片之间狭小空间内空气的 Knudsen 数则为1.3。

运动气体的 Mach 数(Ma)是该气体的速度和可压缩性的度量，其定义为：

$$\mathrm{Ma}=\frac{V}{\alpha} \tag{12.6}$$

式中，V 是运动气体的速度；α 是声音在该气体中的传播速度。理想气体中的声速可以由下式求得：

$$\alpha^2=\frac{c_pRT}{c_v} \tag{12.7}$$

式中，c_p和c_v分别是气体在恒定压力和恒定体积条件下的比热；R 是气体常数；T 是气体的热力学温度。

对于室温下的空气，声音在其中传播的速度大约为343 m/s。如果某种气体的 $\mathrm{Ma}<0.3$，则可以认为这种气体是不可压缩的。

因此我们可以认为在极低压力下流动的稀薄气体是不可压缩的，因为它具有较高的 Knudsen 数($\mathrm{Kn}>0.1$)和较低的 Mach 数($\mathrm{Ma}<0.3$)。同样可以预计气体分子之间的碰撞在气体的流动特性中起决定作用，我们通常用平均自由程λ来表征气体分子之间的碰撞。

12.8.3 微米及纳米尺度气流的建模

经典的 Navier-Stokes 方程式(5.20)在微米及纳米尺度流体中是否仍然适用，是微流体器件设计工程师们经常会遇到的一个关键问题。图12.12所示的气流谱可能给这个问题的解答提供了有用的线索。从图中可以看出，连续介质理论和 Navier-Stokes 方程可以用来模拟$\mathrm{Kn}<0.01$的气流。如果我们再做适当的修正，使其包括滑移边界条件的话，那么该理论的应用范围还可以进一步扩展到$0.01<\mathrm{Kn}<0.1^+$的范围。如果超出了这个范围，即$\mathrm{Kn}>0.1^+$，就必须使用其他的方程，例如 Burnett 方程和修正的玻尔兹曼方程[Patterson，1971；Beskok 和 Karniadakis，1999]。有关这些方程的讨论都超出了本书的覆盖范围，我们在本章中将不做介

绍。关于这些方程的详细描述，有兴趣的读者可以参阅一些专门论述气体动力学的书籍，例如参考文献[Patterson，1971]等。

如图12.12所示，如果 $Kn>10$，那么气流是以自由分子运动的形式流动的。一个管道中自由气体分子的质量流速可以利用下式求得[Beskok 和 Karniadakis，1999]：

$$\dot{m}_{fm}=\frac{4d^3\Delta P}{3L}\sqrt{\frac{2\pi}{RT}} \tag{12.8}$$

式中，d 和 L 分别是管道的直径和长度，其中 L 满足 $d<L<\lambda$；λ为气体分子的平均自由程。d 和 L 的单位都是米(m)；压降 ΔP 的单位是帕斯卡(Pa)或 Kg_f/m^2；气体常数 R 和温度 T 的单位分别是 J/kg·K 和开尔文(K)；式(12.8)中 $\sqrt{RT}$ 的单位是米每秒(m/s)；因此，上式中质量流速的单位则是千克每秒(kg/s)。

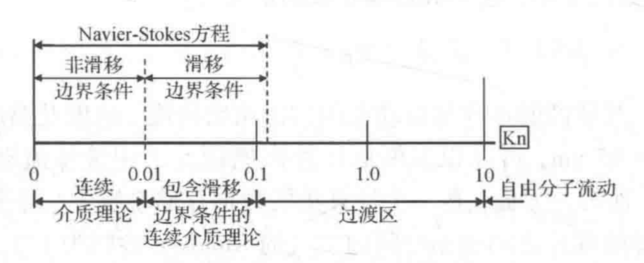


图12.12　气流谱范围

例题12.1　试估算在一段微小管道中流动的氮气的质量流速。已知管道直径为30 nm，长度为50 nm，驱动气体流动的压力差为0.5 Pa，气体的流动是在20℃的室温下进行的。

解答：由题意可知，$L=50$ nm，$d=30$ nm，$\Delta P=0.5$ Pa，$T=293$ K。在使用方程(12.8)计算质量流速之前，还需要求出以下参数。由于氮气与空气的气体常数非常接近，因此可以使用空气的气体常数 $R=286$ J/kg·K 来近似代替。取该气体的平均自由程为 $\lambda=65$ nm，可以求得该气体的 Knudsen 数为 $Kn=\lambda/d=65/30=2.17$。

将上述数值代入式(12.8)，就可以求得气体的质量流速为：

$$\dot{m}_{fm}=\frac{4(30\times10^{-9})^3(0.5)}{3(50\times10^{-9})}\sqrt{\frac{2\pi}{286\times293}}=3.116\times10^{-18}\ \text{kg/s}$$

这个质量流速极低，可见该气体在纳米尺度下是一个滞流气体。

前面提到的两位作者[Beskok 和 Karniadakis，1999]提出了一个统一模型，该模型对在管道或沟渠中流动的、具有任意 Knudsen 数($0\leqslant Kn\leqslant\infty$)的二维气流都是适用的。

对于管式流动，归一化的气体质量流速可以通过下式求得：

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{fm}}=\frac{3\pi}{64\overline{Kn}}(1+\alpha\overline{Kn})\left(1+\frac{4\overline{Kn}}{1-b\overline{Kn}}\right) \tag{12.9}$$

式中，$\overline{Kn}$是在平均压强下的 Knudsen 数，而平均压强则为 $\bar{P}=(P_{in}+P_{out})/2$，其中 P_{in}和 P_{out} 分别是管道入口处和出口处的压强。参数 α 与稀疏系数 C_r 有关，即 $C_r(Kn)=1+\alpha Kn$，该参数可以由实验确定。

对于管式流动，参数 α 的近似值可以通过下式求得：

$$\alpha\approx\left[\frac{64}{3\pi(1-4/b)}\right] \tag{12.10}$$

式中，系数 b 与边界条件有关：对于无滑移边界条件，可取 $b=0$；而对于滑移边界条件，则可取 $b<0$。例如对于管道中的气流，可取 $b=-1$，代入式(12.10)，得到 $\alpha=1.358$。此时，式(12.9)[①]可以写为下述形式：

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{fm}}=\frac{3\pi}{64\mathrm{Kn}}(1+1.358\overline{\mathrm{Kn}})\left(1+\frac{4\overline{\mathrm{Kn}}}{1+\overline{\mathrm{Kn}}}\right) \tag{12.11}$$

在例题 12.1 中，如果假设 $\mathrm{Kn}\approx\overline{\mathrm{Kn}}=2.17$，则利用上式可以求得比值 $\dot{m}/\dot{m}_{fm}=1.001$。

例题 12.2　试估算在一段直径为 10 μm、长度为 1 cm 的小管道中空气的流速。假设这段管道的入口和出口之间维持 5 Pa 的压力差，空气流动时的温度为室温。

解答：首先，可以估算出其 Knudsen 数为：

$$\mathrm{Kn}=\frac{\lambda}{d}=\frac{65\times10^{-9}}{10\times10^{-6}}=0.0065$$

在这种情况下可以利用式(12.8)求得等效的自由分子质量流速为：

$$\dot{m}_{fm}=\frac{4\times(10\times10^{-6})^3\times5}{3\times(10000\times10^{-6})}\sqrt{\frac{2\times3.14}{286\times293}}=5.77\times10^{-15}\ \mathrm{kg/s}$$

假设 $\mathrm{Kn}\approx\overline{\mathrm{Kn}}=0.0065$，代入式(12.11)，可以得到：

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{fm}}=\frac{3\times3.14}{64\times0.0065}(1+1.385\times0.0065)\left(1+\frac{4\times0.0065}{1+0.0065}\right)=23.44$$

由此可以求得这段管道中空气的质量流速为：

$$\dot{m}=23.44\times5.77\times10^{-15}=0.13524\times10^{-12}\ \mathrm{kg/s}\ \text{或}\ 0.487\ \mu\mathrm{g/hr}$$

12.9　纳米尺度下的热传导

在 12.6 节中引入了声子的概念，作为纳米尺度物质中的能量载体，它是由物质中的原子在其晶格平衡点附近的振动而引起的。图 12.13 展示了这种晶格原子的振动现象，图中的原子通过化学键结合在一起，如虚线所示。当外部输入的热能作用于原子阵列中心处的原子时，与该原子相关的晶格就会在其初始的平衡位置附近做来回往复的振动，如图 12.13(b)和(c)所示。按照普朗克的假设，在这个过程中就会产生声子，并且该声子携带的能量将沿着原子振动的方向传播，如图 12.13(b)和(c)所示。

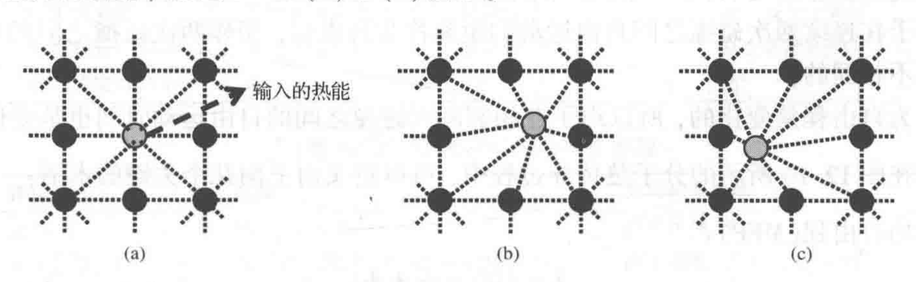


图 12.13　物质中晶格原子的振动：(a)原始状态；(b)t_1时刻的晶格运动；(c)t_2时刻的晶格运动

① 原文误为式(12.10)。——译者注

12.9.1 亚微米和纳米尺度下的热传导

热是能量的一种形式，因此热的流动也需要一个载体。分子热传导理论认为，热传导的载体与物质有关，不同的物质可能具有不同的载体。例如，在金属中，热传导的载体是电子和声子，然而在电介质材料和半导体材料中，热传导的载体则主要是声子。由 12.6 节可知，声子可以看成是一种虚拟的粒子，它能够表征原子所处晶格的能量状态。晶格振动给声子提供能量，从而形成了物质的热量。因此，半导体中的热传导依赖于声子的运动，而金属中的热传导则依赖于声子和电子的运动。

物质中与热传导相关的电子及声子的运动是极其复杂的，这部分内容已经超出了本书的范围。在本节中，我们仅介绍固体中分子热传导的基本规律。

读者如果想了解有关这个论题的详细介绍，可以参阅相关的参考文献[Tzou，1997；Tien 等人，1998；Flik 等人，1992；Tien 和 Chen，1994]。

我们可以设想，任意一块固体材料中都有数以百万的声子“颗粒”。因此，这些传导热量的声子不可避免地会与其他声子发生大量的碰撞。图 12.14 展示了热量是如何从 A 平面向 B 平面传导的过程。由于固体中的热传导过程主要依靠声子的流动，所以我们可以假设这个热传导过程就是声子的运动过程。由于固体材料中声子的数量非常庞大，因此固体中自由声子在运动过程中发生相互碰撞是不可避免的。

如图 12.14 所示，在 t_1时刻，一个声子(图中黑色圆形所示)从 A 平面上的 P_1位置处开始进行热传导。在 t_2时刻，该声子在运动了 d_1距离后，在 P_2位置处与位于其运动路线上的另一个声子(图中灰色圆形所示)发生碰撞。与相邻声子的碰撞将会改变该声子的运动方向(我们称之为声子散射)，如图中所示。随后，在经过了几次类似的与附近其他声子的碰撞和散射过程之后，该声子最终到达了顶部的 B 平面。对单个声子来说，以下几个现象是必须引起我们注意的：

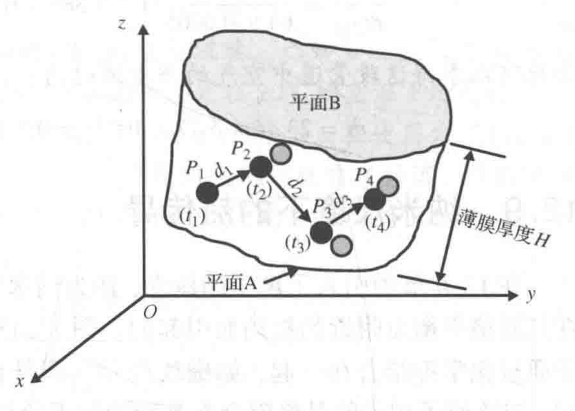


图 12.14 声子运动过程中发生的碰撞

1. 经过每次碰撞之后，声子的运动路径将会发生变化，这个现象称为散射效应；
2. 声子在连续两次碰撞之间自由运动的距离称为自由程，相邻两次碰撞之间的自由程是各不相同的；
3. 因为自由程是变化的，所以声子在相邻两次碰撞之间的自由运动时间也是变化的。

因此在图 12.14 所示的分子热传导过程中，可以定义出下面几个关键的术语：

1. 平均自由程(MFP)：

$$\lambda = \frac{1}{3}(d_1 + d_2 + d_3)$$

2. 平均自由时间(MFT)：

$$\tau = \frac{1}{3}[(t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) + (t_4 - t_3)] = \frac{1}{3}(t_4 - t_1)$$

对于固体中热传导的载体来说，上述表达式给出的平均自由程反映了这些载体在体材料

中要丢失其多余的能量所需要运动的平均距离。通常很难给出平均自由程和平均自由时间的准确数值，因为它们既与环境温度密切相关，同时也强烈依赖于材料的分子结构，例如，分子之间的聚合、晶体结构以及晶粒边界等。下面给出的是关于平均自由程和平均自由时间的一些近似值，工程师们可以用它们来定性地评估亚微米和纳米尺度固体中的热传导情况。

室温下电子的平均自由程大约是 10^{-8} m，而声子碰撞/散射的平均自由程一般要远大于电子的平均自由程。例如，测量得到金刚石薄膜中声子的平均自由程大约为 10^{-7} m。正如我们在 12.8.2 节中所指出的，气体分子的平均自由程大约为 65 nm，而液体分子的平均自由程则大约是其分子尺寸的两倍。电子和声子的平均自由程都强烈地取决于温度，它们都会随着温度的升高而减小。

金属中平均自由时间的典型值在 10^{-12} s 的量级，而在介质材料中，平均自由时间则介于纳秒与皮秒之间。平均自由时间的长短显然会随着材料几何结构上的突变而发生显著变化，例如，薄膜材料上的裂缝或界面就会对其有影响。

在宏观热传导过程中，图 12.14 所示的薄膜厚度 H 通常很大，或者相应的空间范围很大，足以容纳成千上万的声子在其中发生碰撞。在这样的过程中，与单个能量载体(例如，声子)的碰撞相关的平均自由程及平均自由时间都是无关紧要的，因为在对整个固体材料取平均时，其影响将被抵消，正如宏观尺度热传导过程中时间长度上的平均效果一样。然而当固体材料的尺寸缩小到亚微米和纳米尺度时，声子的碰撞/散射效应就会变得至关重要。因此亚微米和纳米尺度固体材料中的热传导现象必须要同时考虑长度效应和时间效应。从本质上说，纳米尺度固体材料中的热传导现象都是瞬态效应。

表 12.2 给出的总结对于理解各类物质中主要的热载体是非常有用的[Tien 和 Chen, 1994]。与宏观热传导相比，亚微米和纳米尺度范围内的热传导有两个显著的变化：(1)热导率；(2)与方程(5.31)相类似的热传导方程。亚微米与微米/宏观热传导之间近似的分界线是 $H<7\lambda$[Flik 等人, 1992；Tien 和 Chen, 1994]，其中 H 是薄膜的厚度，λ是声子的平均自由程。对于半导体硅材料来说，表 12.3 给出的 $\lambda\approx10^{-7}$ m，当由该材料构成的薄膜厚度 H 小于 0.7 μm 时，在进行相关的设计分析时就必须采用纳米尺度的热传导理论了。

表 12.2　几种热载体的基本特点

特点	自由电子	声子	光子
热载体在其中起主要作用的物质	金属中的热传导	介质材料和半导体材料中的热传导	热辐射
产生的来源	价电子或激发电子	晶格振动	原子或分子跃迁
传输媒介	真空或媒介中	媒介中	真空或媒介中
近似速度(m/s)	10^6	10^3	10^8

表 12.3　薄膜材料的热导率参数

参数	金属①	介质和半导体
比热，C	电子比热，C_e	声子比热，C_s
分子速度，V	电子费米速度，$V_e\approx1.4\times10^6$ m/s	声子速度(声速)，$V_s\approx10^3$ m/s
平均自由程，λ	电子平均自由程，$\lambda_e\approx10^{-8}$ m	声子平均自由程，$\lambda_s\approx10^{-7}$ m或更高

资料来源：[Flik 等人, 1992；Tien 和 Chen, 1994]。

① 原文误为“材料”。——译者注

12.9.2 薄膜的热导率

目前人们已经提出了好几个模型用来估算各类材料在亚微米尺度下的热导率。下面给出的是关于薄膜材料热导率 k 的一个简单模型，它是根据分子动力学理论推导得出的[Rohsenow 和 Choi, 1961]：

$$k = \frac{1}{3}CV\lambda \tag{12.12}$$

式中，有关 C、V 和 λ在金属、介质和半导体材料中的确切定义可以参阅表12.3中所述，该表同时还列出了有关这些参数的近似值，可以用来进行定性的估算。

下面给出的是一个更为简单明了的用于估算薄膜材料热导率的模型[Flik 和 Tien, 1990]，根据该模型，垂直于薄膜表面方向的热导率为：

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k} = 1 - \frac{\lambda}{3H} \tag{12.13a}$$

而平行于薄膜表面方向的热导率则为：

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k} = 1 - \frac{2\lambda}{3\pi H} \tag{12.13b}$$

上述两式中，k 是宏观尺度下相同体材料的热导率。

在亚微米及纳米尺度的热传导分析中，方程(12.13)为工程师们估算固体材料的热导率提供了一个更为简单明了的方法。但是，利用上面公式得到的热导率估算值与实验测量值之间仍然是有差异的。如果利用上述模型来计算垂直于薄膜表面的材料热导率，则当薄膜厚度 $H<7\lambda$时，可将误差控制在5%以内；如果利用上述模型来计算平行于薄膜表面的材料热导率，则当薄膜厚度 $H<4.5\lambda$时，同样可将误差控制在5%以内。

例题 12.3 试估算厚度为0.2 μm的硅薄膜的热导率。

解答：依据表12.3，可以查得声子的平均自由程为 $\lambda_e = 10^{-7}$ m。将其代入方程(12.13a)，就可以求得厚度为0.2 μm的硅薄膜的热导率为：

$$k_{\text{eff}} = \left(1 - \frac{\lambda_e}{3H}\right)k = \left(1 - \frac{10^{-7}}{3\times(0.2\times10^{-6})}\right)k = 0.833k$$

再根据表7.3可以得到 $k = 1.57$ W/(cm · ℃)，因此垂直于该硅薄膜表面的热导率为 $k_{\text{eff}} = 0.833\times1.57$ W/(cm · ℃) $= 1.308$ W/(cm · ℃)。

同样，利用方程(12.13b)，可以计算得到平行于该硅薄膜表面的热导率为 $k_{\text{eff}} = 0.894k = 1.404$ W/(cm · ℃)。

12.9.3 薄膜的热传导方程

大多数工程师都认为，当热通量 $q(\mathbf{r},t)$在固体的边界之间流过时，就会在固体中形成温度差或温度梯度$\nabla T(\mathbf{r},t)$。反之也一样，当固体中维持一个温度梯度时，也会在固体中产生热流。一个关键问题是从施加热通量或温度梯度到最终产生相应的温度梯度或热流之间需要经历多长时间。我们可以直观地假设，上述输入的原因或条件一旦具备，对应的结果也就立刻产生出来了，即原因的出现与结果的产生之间没有时间延迟。这个观点实际上是我们推导经典的傅里叶热传导定律方程(5.28)的基本假设之一。然而，这个热流与温度梯度同时发生的假设与我们在图12.14中解释的固体中的热传导过程显然是相互矛盾的。从图中可以看

出，声子需要有限的时间才能将热量从固体中的某一个位置传导到另一个位置，所谓的平均自由时间就是用来表示声子将热量从某一个位置传导到另一个位置所需的时间。从本质上说，正是平均自由时间导致了固体中热传导过程的延迟，从而导致了固体材料边界上热流的施加与温度梯度的建立之间的时间延迟。

在宏观固体材料的热传导过程分析中，由于采用的时间尺度相对来说比较大，因此热流与对应的温度梯度之间的延迟，即滞后时间，并不是一个重要的影响因素。然而在亚微米及纳米尺度的固体材料中，如果对这个延迟时间没有进行适当的补偿校正的话，那么就会给热传导分析带来显著的误差。因此，我们需要对方程(5.31)所反映的热传导方程进行必要的修正，即在方程(5.31)的基础上再额外添加一项，以考虑滞后时间带来的影响。修正后的热传导方程为：

$$\nabla^2 T(\mathbf{r},t) + \frac{Q}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \frac{\tau}{\alpha}\frac{\partial^2 T(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} \tag{12.14}$$

上式右边的最后一项反映固体材料中热传导的速度，如图12.14所示，它是以温度$T(\mathbf{r},t)$波的传播延迟的形式体现出来的，称为固体中的热波传播延迟，当$H \gg \lambda$时，这一项就可以忽略了。上述方程中的变量τ称为弛豫时间，它是指一个热载体(例如声子)在相邻两次碰撞之间自由运动时间的平均值。通常可以利用下式来估算τ值：

$$\tau = \frac{\lambda}{V} \tag{12.15}$$

式中，λ是热载体的平均自由程，而V是热载体的平均速度。

我们从表12.3中很容易看出，对于半导体材料来说，τ的大小在10^{-10} s的量级。

根据文献[Flik等人，1992]可知，当观察时间t小于H^2/α时，就应该采用方程(12.15)，其中H是薄膜的厚度，α是材料的热扩散率。

12.10 热传导的测量

正如我们在5.7.1节中所述，材料的热导率k是其导热能力强弱的一个度量。一般情况下，金属的导热能力要优于半导体和绝缘体。我们也知道，在亚微米和纳米尺度中，材料的很多特性(包括热导率)都是与尺寸相关的。从12.9节中以及方程(12.13)中都可以看到，材料的热导率k会随着其尺寸的减小而不断减小。从例题12.3中也可以看到，硅薄膜的热导率已经显著降低。

各种材料在亚微米及纳米尺度下的热导率是微米和纳米工程设计中的一个重要参数。在分子电子学领域，随着相邻电路之间缝隙的急剧减小，过热和漏电已经变成了该领域内两个最严重的问题。因此精确地估算出亚微米及纳米尺度衬底材料的热导率是纳米尺度电路热力学设计的重要需求。

许多方程和公式，包括方程(12.13)，主要是利用薄膜材料中热传导的测量数据归纳得到的。在宏观尺寸中，人们已经建立起了非常完善的热传导测量技术。图12.15所示就是在宏观尺度下测量诸如金属等导热材料热导率k的一种典型装置。该装置中有两个直径相同、长度分别为L_A和L_B的圆柱体A和B，其中圆柱体A的热导率k_A已知，而圆柱体B的热导率k_B则未知，是需要测量的热导率。这两个圆柱体被放置在测试腔中，如图12.15所示。组合成的圆柱体样品在其圆周方向上被热绝缘体隔离，以保证热量只能在一维的纵向方向上流

动。圆柱体的一端(圆柱体 A)与一个热源相连，而样品的另一端(圆柱体 B)与一个热沉装置相连，因此热量就会从热源流向热沉。应用傅里叶热传导定律的方程(5.27)，可以推导出圆柱体 B 的热导率 k_B 的表达式为：

$$k_B = \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} k_A \tag{12.16}$$

式中，ΔT_A 和 ΔT_B 分别是两个圆柱体两端的温度差，它们可以分别利用与圆柱体 A 和 B 两端相连的热偶来测得。

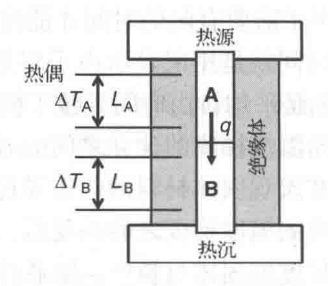


图 12.15　测量导热材料热导率的装置

测量半导体材料的热导率使用的是另一个不同的测试装置，这主要是因为半导体材料的 k 值比较低(如表 7.3 所示，铜的热导率是硅的 2.5 倍)。由于其 k 值较低，所以相比于 k 值较高的导热材料的测量，更加需要保证样品中的热流必须在一维方向流动。图 12.16 所示就是一种测量半导体材料热导率的装置。

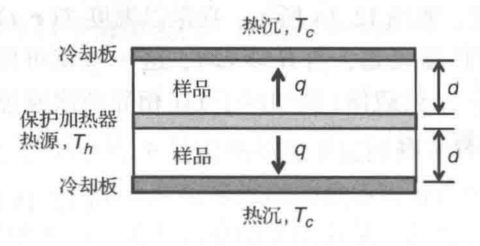


图 12.16　测量半导体材料热导率的装置

如图 12.16 所示，两块由厚度为 d 的半导体晶圆片材料构成的样品被放置在一块热板的两个面上，其中的热板在这里起热源的作用。每块样品的另一个表面与热沉装置相连。通过严格控制并精确测量样品/热源/热沉装置之间界面处的温度，就可以利用下面的表达式求得样品材料的 k 值：

$$k = \frac{d}{A(T_h - T_c)} q \tag{12.17}$$

式中，d 是样品的厚度，A 是接触面的面积，q 是热板输出的热通量，T_h 和 T_c 分别是热源与热沉装置的温度。

然而，用来测量亚微米和纳米尺度固体材料热导率的装置则要复杂得多。无论是图 12.15 还是图 12.16 所示的这两种可以用来测量宏观尺寸固体材料热导率的装置，都无法用来测量薄膜材料的热导率 k，原因如下：

1. 半导体薄膜或介质薄膜的热导率 k 要比宏观尺度导热材料的热导率低得多。因此，测量这类纳米尺度材料热导率的技术必须具有较高的分辨率和精度；
2. 样品的尺寸较小，并且非常薄，在测量系统中，目前还没有一个切实可行的方法能够制造出可以定位和安置这些微小样品的夹具；
3. 由于样品非常薄，很难像在传统的热导率测量装置中那样，可以保证热流仅在一维方向流动；
4. 对于薄膜样品来说，在样品厚度方向上的温度梯度也非常小以至于很难精确测量；
5. 对于微小样品来说，几乎没有空间来安置测量温度的热电偶。

针对上述情况，人们已经发展了两种可以用来测量亚微米和纳米尺度薄膜材料热导率的技术，下面将分别予以介绍。

3ω 方法：这种方法是文献[Cahill, 1990]中最早提出的，该方法的理论基础来源于一本经典的热传导书籍[Carslaw 和 Jaeger, 1959]中给出的一个早期的例题。

如图 12.17 所示为一个半无限大的固体材料，即该固体材料具有无穷大的表面积和无穷大的深度，并且该固体表面上有一个微小的线热源，这个线热源以角频率 ω 周期性地产生热

量，角频率 ω 的单位是弧度每秒。如果线热源采用如图 12.17 所示的 (x, y) 坐标系来定义的话，则在固体内与线热源中心点相距为 r 的点 $P(x,y)$ 处的温度变化可以表示为：

$$\Delta T(r)=\frac{1}{\pi k}\left(\frac{P}{L}\right)K_0(qr) \qquad (12.18)$$

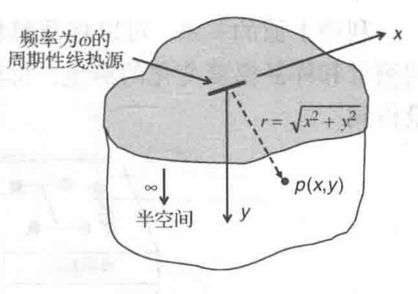


图 12.17　带有一个线热源的半无限大固体材料

式中，r 是线热源与待测温点 (x,y) 之间的直线距离，$r=\sqrt{x^2+y^2}$；P 是线热源以角频率为 2ω 时所产生功率的大小；L 是线热源的长度；k 是半无限大固体材料的热导率；$K_0(qr)$ 是修正的零阶第二类贝塞尔函数。

方程(12.18)中的变量 q 由下式给出：

$$\frac{1}{q}=\sqrt{\frac{\alpha}{\mathrm{i}2\omega}}$$

式中，α 为固体材料的热扩散率，$\mathrm{i}=\sqrt{-1}$。

由方程(12.18)所表示的半无限大固体材料中的温度变化 ΔT 与其热导率 k 之间所满足的关系是 3ω 方法测量薄膜材料热导率的基础。

参照文献[Cahill, 1990]中的方法，我们来考虑图 12.18 所示的情况。

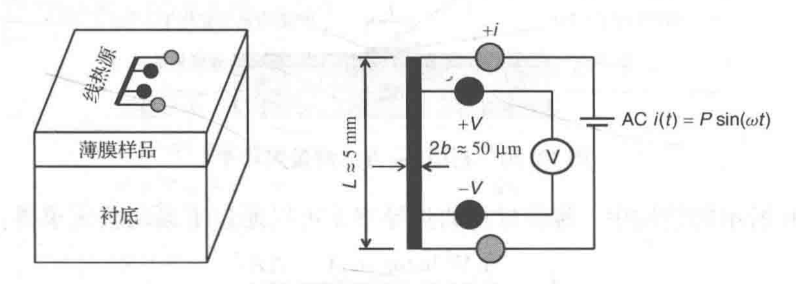


图 12.18　半无限大固体表面线热源的电源供应

在待测热导率的薄膜材料表面淀积一层导电的金属细条，该金属细条的长度为 L，宽度为 $2b$，由铜或金构成。在其上通入交流电流 $i(t)$，该金属细条就构成了一个线热源。交流电流为 $i(t)=P\sin(\omega t)$，其中 P 为最大功率，ω 为交流电流的角频率，t 是时间。除了用作线热源之外，该金属细条还可以用作测量线热源温度的精密热电偶。待测热导率的薄膜材料则淀积在具有较低热导率的衬底上。这个线热源金属细条上有 4 个引出端，其中两个用来测量电压，另外两个用于电源输入，如图 12.18 所示。

在图 12.18 中，与薄膜材料样品相比，线热源的尺寸非常小，以至于我们可以很好地近似认为线热源是位于一个半无限大固体的表面，即如图 12.17 所展示的情形。因此薄膜上的温度变化可以由式(12.18)求出。

图 12.19 所示是线热源上 4 个引出端的另外一种排列方式，在这种排列方式中，上述 4 个引出端分别位于线热源的两侧。

Cahill 在文献[Cahill, 1990]中给出了有关电源输入频率 ω 与对应的固体温度变化以及线热源上电压变化之间关系的研究结果，他最后得出的结论是：在半无限大的固体中，如果供给线热源的交流电源频率为 1ω，那么根据式(12.18)，将可以推断出以下关系成立：

1. 薄膜材料上的温度变化与线热源电阻的变化有关，并以 2ω 的频率进行振荡；

2. 从线热源两端测得的电压中包含一个振荡频率为 3ω 的分量。

利用上面的关系，可以将薄膜材料样品热导率的测量转化成对电压变化的 3ω 频率分量的测量和样品温度变化的测量，而样品的温度变化又可以通过测量线热源电阻变化的 2ω 分量得到。

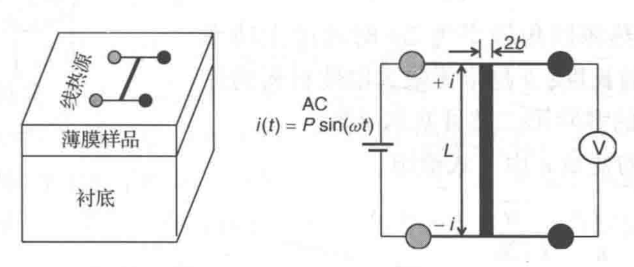


图 12.19　测量薄膜材料热导率的另一种装置示意图

因此我们可以通过将薄膜材料样品淀积在一块衬底材料上，如图 12.20 所示，来测量该薄膜材料的 k 值。

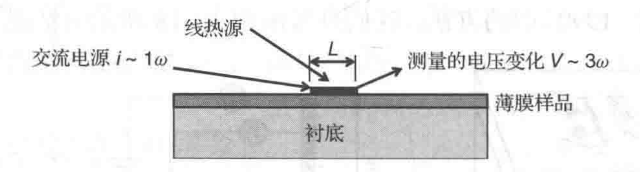


图 12.20　利用 3ω 方法测量热导率

在图 12.20 所示的结构中，薄膜材料的热导率 k 可以通过下面的公式求得：

$$k = \frac{V^3 \ln(\omega_2/\omega_1)}{4\pi L R^2 (V_{3,1} - V_{3,2})} \frac{\Delta R}{\Delta T} \tag{12.19}$$

式中，ω_1、ω_2是给线热源供电的电源的两个输入的角频率；R 是线热源的电阻；V 为金属线热源两端频率为 1ω 的电压分量；$V_{3,1}$ 和 $V_{3,2}$分别是在供电电源频率为 ω_1 和 ω_2时测得的线热源两端频率为 3ω 的电压分量；ΔR 和 ΔT 分别是将供电电源的角频率从 ω_1 变化到 ω_2时，在薄膜上给定点处测得的电阻变化量和温度变化量(与频率为 2ω 的分量相关)。

式(12.19)中的 $\Delta R/\Delta T$ 项是用来校准线热源的温度与其电阻之间的变化关系的。这种方法已经被用来测量非晶态 SiO_2 材料的热导率，也用来测量耐高温陶瓷粘合剂 9606 和派热克斯耐热玻璃 7740 的热导率[Cahill, 1990]，还可以用来测量 SiO_2 薄膜的热导率[Kim 等人, 1999]。

3ω 方法也可以用来测量垂直取向的碳纳米管的热导率[Hu 等人, 2006]。在该实验中，所使用的碳纳米管样品长度为 13 μm，直径在 10 ~ 80 nm 之间。在 295 K 和 323 K 的温度下，测量得到的热导率分别为 74 W/m · K 和 83 W/m · K，测得的热导率与温度之间似乎呈线性关系。在同一个温度下多次测量的数据离散程度大约为 ±2 W/m · K。

扫描热显微镜技术：该方法需要用到一种带有加热尖端的特殊原子力显微镜。如图 12.21 所示，薄膜样品被安置在一个高精度的传动装置上，该传动装置能够在三个相互垂直的方向上沿着 x、y 和 z 轴移动，从而使原子力显微镜能够扫描到薄膜样品的表面形态。原子力显微镜的尖端能够加热接触点处的样品，同时也能够测量该点处样品的温度，如图中左下角的 $T(x)$ 和 $T(y)$ 曲线所示。

该方法通过测量 z 方向上的热流可以得到薄膜样品在 z 方向上的热导率 k_z，然而，对于在另外两个方向上的热导率 k_x 和 k_y，则可以分别通过测量温度沿表面的变化曲线，即图中所示的 $T(x)$ 与 x 以及 $T(y)$ 与 y 的变化曲线得到。

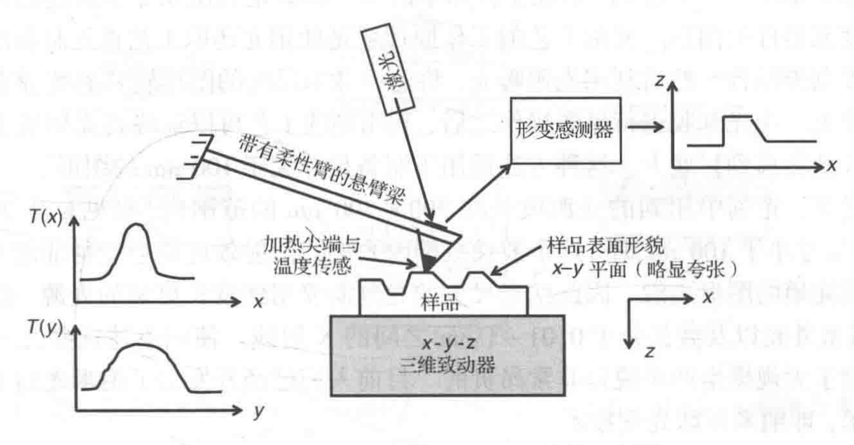


图 12.21　利用扫描热显微镜测量热导率的装置

除了这两种方法之外，还有其他几种测量薄膜材料热导率的方法，表 12.4 中列举了这些测量方法以及它们能够达到的空间分辨率。

表 12.4　几种测量薄膜热导率的热显微技术

测量技术	空间分辨率
扫描热显微镜方法	<100 nm(=0.1 μm)
近场光学测温方法	<1 μm
激光表面反射法	1 μm
液晶法	1 μm
拉曼光谱法	1 μm
红外线测温法	1 ~ 10 μm

Fiege 等人发展了一种将 3ω 法与扫描热显微镜法结合在一起的测量薄膜热导率的方法及装置[Fiege 等人，1999]，在这种方法中使用热扫描显微镜法测量沿薄膜表面切向的热导率 k_x 和 k_y，同时使用 3ω 法测量垂直于薄膜表面方向上的热导率 k_z。

12.11　纳米技术面临的挑战

自从 50 年前 Feynman 指出了纳米技术可能带来的无限机遇以来，不论是在科学界和工程技术领域，还是在商业界和政府的资金机构，都激起了人们巨大的热情。的确，纳米技术已经取得了一系列重大成就，陆续开发出了许多由纳米颗粒、纳米线、纳米管组成的新型纳米产品，并且已经成功应用在很多领域中，如 12.5 节中所述。然而，为了进一步投资开发这项新兴技术，科学家和工程师们仍然面临着很多挑战。我们在此指出下面的 5 个方面是科学家和工程师们面临的主要挑战。

12.11.1 纳米加工技术中的纳米图形化技术

我们在第8章中已经了解到，微加工技术中的第一步就是利用8.2节所述的光刻工艺制备出微米尺度元器件的图形。光刻工艺的工作原理就是使用光还原工艺首先制备出含有微米尺度图形的光刻掩模板。然后利用光源曝光，将这些微米尺度的图形转移到覆盖在衬底表面的光刻胶薄膜上。在光刻胶进行显影操作之后，利用刻蚀工艺可以最终将光刻胶上的微米尺度图形永久性地转移到衬底上。这种方法适用于制备尺寸大于100 nm的图形。

通常情况下，光刻中用到的光源波长在300～500 nm的范围内(参见8.2.3节中的介绍)。当图形尺寸小于100 nm时，这个波长范围内光束的衍射效应就会变得非常重要，使得难以获得清晰陡峭的图形边沿。因此纳米尺度的光刻需要用到波长更短的光源，例如波长为13.5 nm的极紫外光以及波长介于0.01～1 nm之间的X射线。使用上述这些光源的纳米尺度光刻技术对于大规模生产来说是非常昂贵的。目前人们已经开发出了纳米光刻工艺的另外一种替代技术，即纳米压印光刻技术。

纳米压印光刻技术(简称NIL)最早是由Stephen Y. Chou提出来的[Chou, 1998]。由于该技术需要使用热塑性材料并在工艺中需要对热塑性材料进行加热，所以工业界常常也把这种技术称为热塑性纳米压印光刻技术(缩写为T-Nil)或热模压印光刻技术。NIL的工作原理类似于使用表面刻有图案的印章在纸上印出一个图形的过程。图12.22展示了一个典型的T-Nil工作原理，首先在衬底表面旋涂一层热塑性聚合物(例如聚甲基丙烯酸甲酯，缩写为PMMA)作为压印薄膜，如图12.22(a)所示，这个过程与8.2.2节中介绍的涂胶过程类似。然后将刻有图形的模具与热塑性涂层薄膜接触，并且施以适当的压力，如图12.22(b)所示，其中模具上的图形是使用诸如电子束刻蚀等技术制备的。接下来在热压印腔中加热并使其温度高于热塑性材料的玻璃态转变温度，从而将模具压入到热塑性材料中。待其冷却之后，将模具移除，就会在热塑性抗蚀剂材料上留下永久的图形，如图12.22(c)所示。接下来再使用反应离子刻蚀工艺刻蚀掉部分聚合物薄膜，直到露出衬底。最后以剩下的图形化聚合物薄膜作为掩蔽膜来刻蚀衬底表面，就可以将聚合物薄膜上的图形转移到衬底上。据报道，这种方法实现的线条分辨率为250 nm。

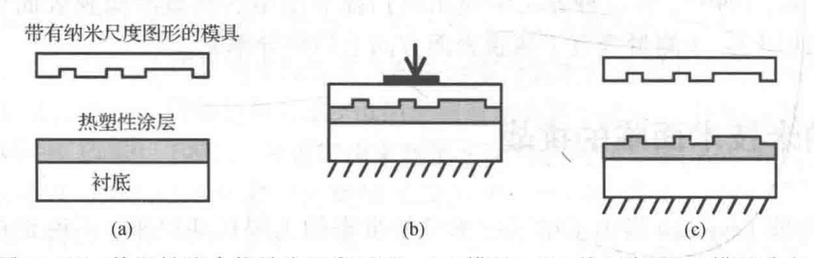


图12.22 热塑性聚合物纳米压印过程：(a)模具；(b)热压印；(c)模具分离

紫外-纳米压印光刻技术(简称UV-Nil)具有比T-Nil技术更高的图形分辨率。这种方法的工作原理与T-Nil技术类似，只是使用紫外光代替T-Nil技术中的加热来固化涂敷在衬底表面的聚合物薄膜。图12.23展示了UV-Nil技术的原理步骤。该方法使用的模具通常是采用石英等透明材料制作的，如图12.23(a)所示。为了使用非常小的作用力就可以将模具压入到聚合物涂层中，如图12.23(b)所示，就必须使用具有低黏度的聚合物涂覆材料，例如柔软的聚二甲基硅氧烷(PDMS)等。然后使用紫外光穿过透明的模具照射到聚合物涂层上并使其

发生固化，如图 12.23(c)所示。完成固化处理之后，就可以将模具从压印薄膜上分离出来，如图 12.23(d)所示。

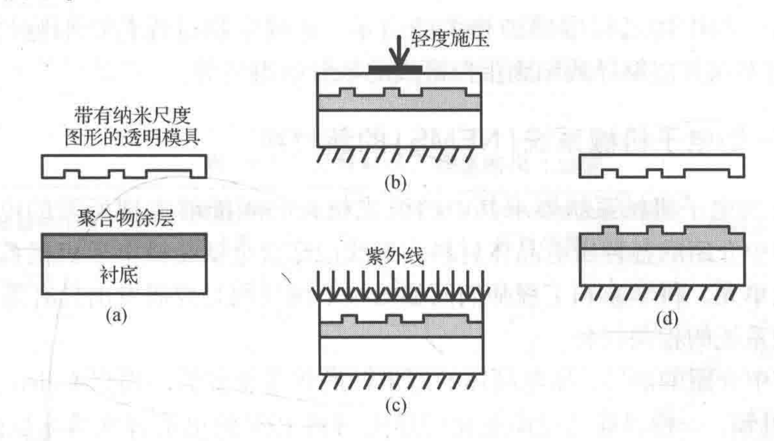


图 12.23　紫外纳米压印过程：(a)模具；(b)压印；(c)紫外光固化；(d)模具分离

由于 UV-Nil 技术可以在室温下完成，这样就能够避免聚合物涂覆材料在转变温度附近带来的尺寸稳定性问题。通常 UV-Nil 技术可以制备出的图形特征尺寸在 50 nm ~ 20 μm 之间。

采用上述两种纳米压印方法来制备纳米图形仍然面临着一些技术挑战：

1. **套印精度**：完成压印之后，将模具与聚合物涂层分离时经常会导致图形发生扭曲变形，从而会影响到微小压印图形边缘的准确度。光学对准和温度控制是影响制备出高质量纳米图形的另外两个原因。
2. **聚合物涂覆材料或抗蚀剂的选取**：通常希望所选择的聚合物材料适用于低温和低压力的压印操作，并且在经过固化处理之后具有最小的收缩量。同时在与模具进行分离时，它们还必须有足够的机械强度和抗撕裂强度。
3. **模板**：所谓模板指的就是在其接触面上具有永久性纳米图形的模具。从纳米制造的角度来看，这些模具必须是完全没有缺陷的。为了便于在完成压印操作之后将模具与涂覆材料分离，还必须在模具上涂敷一层合适的防粘连涂层。其他方面需要关注的问题还包括在每次压印操作之后的清洗以及降低由于衬底与模具之间热膨胀系数的失配所引起的热应力/应变，特别是在 UV-Nil 技术中。

12.11.2　纳米组装

12.3 节中介绍的纳米制造技术已经激发了工程师们设计并制造出各种纳米尺度的环、管道、转轴、轴承以及齿轮等机械元件的浓厚兴趣。正如 12.4 节中所述，现在我们已经成功地制造出了纳米线和纳米管。然而，这些具有简单几何形状的纳米元件的制造技术仍然处在初级阶段。对于多级转轴或齿轮等几何结构更为复杂的纳米元件，就需要像 12.3 节中所介绍的那样，一个一个地将大量的原子组装成所需要的形状。事实上，对于微型元器件的制造而言，这样的加工过程显然是一个不可能完成的任务。举例来说，如果微型元器件的体积为 1 mm^3，假设 1 nm 长度上可以排列 10 个原子，那么我们就必须能够快速地将 10^{21} 个原子组装起来。很显然，这是完全不切实际的想法。因此，自组装合成与复制技术就成为了纳米尺度组装的唯一可行的解决方案。

科学家和工程师们面临的一个主要挑战就是开发出这样一种技术，它能够以一种有序、可控的方式复制出某种特定材料的原子或分子，并能够将其组装成所需要的形状。科学家和工程师们可以从一些生物过程中得到相关的启示，这些生物过程包括细胞的复制和分裂、DNA 中包含特定基因并能够导致细胞蛋白形成的核苷酸组装等。

12.11.3 用于纳电子机械系统(NEMS)的新材料

一个实用化的电子机械系统要求其中的组成材料必须能够实现所需的电子机械功能。第 2 章和第 7 章中介绍的各种压电晶体材料和形状记忆合金就是微电子机械系统(MEMS)中不可或缺的组成单元。科学家和工程师们面临的一个挑战则是要研发出具有类似的性能且适用于纳电子机械系统的相关材料。

正如 7.9 节中介绍的那样，压电晶体的能量转换效率比较低。根据 Gillett 发布的白皮书[Gillett, 2002]可知，一种目前已经商业化的压电材料 PZT 的电能转换效率也仅有 10%，而且当这种材料的尺寸缩小到纳米尺度时，其微小的机械输入将会导致其产生的电能进一步减小。因此工程师们迫切需要研发一种具有更高机电转换效率的纳米压电材料。另一个可选的解决方法是将这些压电晶体材料制成薄膜并且堆叠起来构成一个纳米结构[Gillett, 2002]，这样可以获得更好的压电性能。在这种方法中，纳米尺度压电薄膜的制造、组装和封装将是工程师们面临的一个技术挑战。

纳米磁性材料是另一类非常有用的纳米尺度致动材料。铁磁性材料，包括铁、钴、镍，在外加磁场的作用下，能够变得有磁性。采用电子束光刻技术已经制造出了厚度仅为 6 ~ 15 nm、直径介于 500 nm ~ 50 nm 之间的纳米尺度磁盘[Cowburn 等人, 1999]，这种纳米磁盘是由超透磁合金($Ni_{80}Fe_{14}Mo_5$)构成的。如何使用外加电场来代替磁场使这些纳米磁性材料发生磁化是 NEMS 技术发展面临的一个挑战。对于 NEMS 技术来说，这些电磁性的纳米点或纳米磁盘将是非常有价值的致动材料。现在人们已经成功开发出了铁电/铁磁纳米复合材料 $CoFe_2O_4$-$BaTiO_3$[Zheng 等人, 2004]，这为实现 NEMS 器件提供了很好的备选材料。

12.11.4 解析模型

我们在 12.4 节和 12.5 节中已经知道，纳米材料的一个非常重要的特点就是其特性的尺寸相关性，特别是纳米颗粒的光吸收和光反射特性的改变。最近的一些研究结果表明，某些纳米尺度材料的热物理特性也会表现出尺寸相关性，例如 12.9.2 节中介绍的硅材料的热导率就是如此。除此之外，人们在纳米材料机械特性的测量上也付出了很大的努力。有结果显示，纳米材料的许多机械特性，例如杨氏模量，也会随着尺寸的改变而发生变化。如果将金或铜等可延展金属制备成尺寸在 1 ~ 8 nm 厚的薄膜，其杨氏模量将增加 5% ~ 20%[Liang 等人, 2002]。与之相反，硅的杨氏模量则随着样品厚度的减薄而单调减小[Park 等人, 2005]。表 12.5 中将纳米硅材料杨氏模量的测量值与表 7.2 中给出的体硅材料的结果做了对比。

纳米材料热物理和机械特性的尺寸相关性大大增加了对纳米结构热物理行为进行工程分析的复杂性。分析中所用到的各种控制方程都要求与诸如式(12.3)所示的机械形变方程进行耦合求解，以便更新结构的当前尺寸，从而确定合适的材料特性。材料特性的尺寸相关性使得图 12.12 中所列的用于流体动力学分析的各种控制方程以及用于纳米结构热传导分析的

方程(12.14)都变成了非线性方程。在工程分析所用到的各种有限元方法的基本公式中也必须考虑材料热物理与机械特性的尺寸相关性[Hsu, 1986]。对这些非线性的且相互耦合的方程组进行求解也给科学家和工程师们提出了一个严峻的挑战。对于开发者而言，如何对现有的商业化有限元软件进行适当的修正，使之适应纳米结构所带来的这些复杂的变化，也将是一个艰巨的任务。

表 12.5 硅材料杨氏模量的尺寸效应

米勒晶向指数	体材料的杨氏模量[a]（表 7.2）	厚度为 3 nm 的纳米悬臂梁的杨氏模量[a]	相对变化量%
<100>	129.5	75	42.1
<110>	168.0	110	34.5
<111>	186.5	130	30.3

a 单位：GPa。

12.11.5 测试

正如 Hsu 指出的那样[Hsu, 2004]，微米尺度元器件如此微小的尺寸已经使得其测试工作成为工程师们所面临的一个主要难题。虽然目前这些元器件还没有缩小到纳米尺度，但是在不久的将来，这些元器件的尺寸一定会进一步缩小到纳米尺度，到那时工程师们必将会面临更大的困难和挑战。

12.12 纳米尺度工程的社会影响

纳米技术和纳米尺度工程极富潜力，有可能为改善人类的生活方式提供无穷无尽的机会。下面列出的几种产品可能会在未来的 10 ~ 20 年内实现。

1. 医疗保健：

   新的疫苗或药物，能够治愈许多过去治愈不了的绝症；
   人工合成的抗体，类似于纳米药物，能够寻找并摧毁人体或动物体内的恶性细胞；
   能够将药物输送给人体内需要的细胞或组织，并按需释放药量的纳尺度器件；
   不需要开刀就能够在人体内做外科手术的纳尺度器件；
   可靠且准确的实时医学诊断系统。

2. 智能材料：

   具有自适应热物理特性的智能表面涂覆材料，可用于耐久及低能耗的建筑材料和空调装置中；
   可以用来制造自清洁布匹的智能纤维；
   应用于地面或空中运输设备的超高强度且质轻的材料。

3. 能源：

   清洁能源，包括各种新型的人工合成燃料；
   具有高能量转化效率的化石燃料或者太阳能电池、燃料电池等可再生能源；
   具有超长寿命的能量存储系统，例如各种新型的电池等。

4. 农业：

   各种环境友好型的高效化学杀虫剂；

各种环境友好型的化肥;

农作物和家畜的新品种,能够为全世界的人口提供足够的食物供给。

我们因此不难设想出纳米技术在提高人类社会生活水平上所具有的光辉前景。如果前面提到的在医疗保健方面的工作取得了重大突破,人类的平均寿命就可能会延长到150岁甚至更长。农业生产方面的重大技术革新将从根本上消除饥饿现象。纳米技术进步对人类社会的影响可以说是不可估量的。

我们还可以对更长远的未来做一个展望,下面列举出了到本世纪末纳米技术可能给我们带来的一些"梦想中的产品",它们包括:

1. 只有灰尘大小的计算机,但是其运算能力却比当今的计算机还要高几个数量级;
2. 只有针尖大小的机器人,能够在人体内完成各种生物医学和外壳手术的功能,或者能够在危险的灾害地点实施搜寻和救援;
3. 具有人工智能的机器人,它们将成为我们人类社会的主要劳动力;
4. 能够供全人类无限使用的能源,并且这种能源是清洁、廉价和可再生的;
5. 比今天的家用轿车还要轻便的宇宙飞船,它们适用于星际间的旅行。

纳米技术能够带来的好处绝不仅仅是上面所列出的这几项。随着纳米技术的进一步发展,很多我们现在难以想象的事情都会成为现实。我们不难设想,这个技术将会给我们的人类社会以及我们赖以生存和享受的地球村带来非常多的积极影响。

然而,纳米技术也可能会带来一些负面影响。利用这项技术完全有可能制造出能够在一夜间就将全人类毁灭的大规模致命性疫苗或武器。纳米技术可能带来的另一个负面影响是违背伦理的人体克隆和复制。我们之所以要专门提到这两个内容,是因为它们都有可能给整个人类带来不可逆的严重灾难。因此阻止这类事件的发生也是一切有良知的科学家和工程师的共同责任。

本章习题

第一部分:多项选择

1. 纳米技术讨论的物体的尺度在________范围。

   (1)亚纳米;(2)纳米;(3)微米

2. 1纳米等于________。

   (1)10^{-3} m;(2)10^{-6} m;(3)10^{-9} m

3. 1纳米大约等于________个氢原子排列的长度。

   (1)5;(2)10;(3)15

4. DNA的宽度小于________。

   (1)2 nm;(2)3 nm;(3)4 nm

5. 人类头发的直径大约是________米。

   (1)百分之一;(2)千分之一;(3)百万分之一

6. 一般说来,一个病毒的大小约为________。

   (1)1 nm;(2)10 nm;(3)100 nm

7. 现代纳米技术最早是由Richard Feynman提出来的,他是一名________。

   (1)工程师;(2)化学家;(3)物理学家

8. Feynman 博士在________年发表了关于微型化的著名演讲。
   (1)1939; (2)1949; (3)1959
9. Feynman 博士关于微型化的远见卓识引领了纳米技术的发展，他的这些天才的想法则是受到了________的启发。
   (1)化学系统; (2)物理系统; (3)生物系统
10. 纳米技术的本质是操纵和控制物质中________的组成和结构。
   (1)原子; (2)晶格结构; (3)晶粒间界
11. 纳米技术的主要优点是能够控制物质的________。
   (1)材料特性; (2)几何形状; (3)尺寸
12. 预计到2015年，由纳米技术产生的年收益可达________美元。
   (1)1亿; (2)10亿; (3)100亿
13. 微系统技术的科学基础是建立在________之上的。
   (1)固体物理; (2)量子物理; (3)粒子物理
14. 纳米技术的科学基础是建立在________之上的。
   (1)固体物理; (2)量子物理; (3)粒子物理
15. 原子力显微镜可以用来________。
   (1)观察原子结构; (2)测量固体的表面形貌; (3)测量移动原子所需的力
16. 扫描隧道显微镜可以用来________。
   (1)观察原子结构; (2)测量固体的表面形貌; (3)测量移动原子所需的电功率
17. 扫描隧道显微镜中的隧道是给________提供隧穿路径的。
   (1)原子的流动; (2)热量的传导; (3)电荷的输运
18. 第一个人造纳米结构是________。
   (1)巴基球; (2)纳米颗粒; (3)纳米管
19. 巴基球是采用________制造出来的。
   (1)石墨; (2)碳; (3)蓝宝石
20. 巴基球的直径为________。
   (1)0.5 nm; (2)0.7 nm; (3)1 nm
21. 一般说来，纳米颗粒的尺寸至少在某一维方向上是小于________的。
   (1)10 nm; (2)100 nm; (3)1000 nm
22. 纳米颗粒一个特有的现象是其________随着尺寸的改变而发生显著的变化。
   (1)强度; (2)形状; (3)颜色
23. 纳米颗粒具有极高的表面积-体积比，这使得它们更易于发生________。
   (1)扩散; (2)蒸发; (3)流动
24. 纳米颗粒之所以可以用作生物标签，是因为它具有微小的尺寸和________。
   (1)独特的形状; (2)独特的颜色; (3)独特的硬度
25. 通常纳米线的直径在________的数量级上。
   (1)0.1 nm; (2)1 nm; (3)10 nm
26. 纳米线是________中的基本组成单元。
   (1)分子电子学; (2)分子生物学; (3)分子化学
27. 一般说来，纳米线的电导率________相应体材料的电导率。
   (1)低于; (2)约等于;(3)高于
28. 制备碳纳米管通常采用的技术是通过卷曲________来形成。
   (1)碳60片; (2)石墨片; (3)金刚石片
29. 一般说来，碳纳米管管壁上的原子呈________键合结构。

(1)正方形;(2)金刚石;(3)六方晶系

30. 一般说来,碳纳米管的强度是钢的________倍。

(1)10;(2)20;(3)30

31. 碳纳米管的强度是硅材料的________倍。

(1)6;(2)60;(3)600

32. 一般说来,碳纳米管的导电能力是金属铜的________倍。

(1)10;(2)100;(3)1000

33. 氮化镓(GaN)纳米管是很好的应用于________领域的候选材料。

(1)生物医药;(2)光学;(3)分子电子学

34. 量子物理可以用来描述微电子机械系统和纳米系统中________过程。

(1)原子的实际运动;(2)能量的输运;(3)原子的碰撞

35. 一个量子代表任何系统所能够获得或失去的最小________。

(1)质量;(2)体积;(3)能量

36. 一个声子的质量等于________。

(1)一个电子的质量;(2)一个中子的质量;(3)零

37. 在量子力学中有一个基本假设,即物质中的原子是________。

(1)整齐排列的;(2)通过弹性键相互连接的;(3)没有连接键的杂散排列

38. 物质中原子排列结构的变化是________的结果。

(1)该物质中原子尺寸变化;(2)该物质中原子数量变化;(3)该物质总体积变化

39. 分子动力学研究的是原子在________中的运动。

(1)自由空间;(2)弹性键连接而成的阵列;(3)电场

40. 求解薛定谔方程可以得到在外力和能量作用下的________。

(1)原子瞬时位置;(2)瞬时温度;(3)瞬时电场

41. 利用薛定谔方程的解可以获得纳米尺度对象的________。

(1)瞬时电场;(2)瞬时温度;(3)瞬时尺寸

42. 稀薄气体指的是处于________条件下的气体。

(1)极低压强;(2)中等压强;(3)真空

43. 关于气体平均自由程(MFP)的一个合理的估计值为________。

(1)65 nm;(2)75 nm;(3)130 nm

44. Knudsen 数的定义是________。

(1)气体的密度与其实际空间尺寸之间的比值;

(2)平均自由程与其实际空间尺寸之间的比值;

(3)气体速度与声速之间的比值

45. 常规的流体动力学理论仅适用于 Knudsen 数________的情形。

(1)非常小;(2)较大;(3)非常大

46. 马赫(Mach)数的定义是________。

(1)气体的密度与其实际空间尺寸之间的比值;

(2)平均自由程与其实际空间尺寸之间的比值;

(3)气体速度与声速之间的比值

47. 如果某种气体的马赫数________0.3,那么可以认为该气体是可压缩的。

(1)小于;(2)等于;(3)大于

48. 气体的 Knudsen 数越大,则气体的限制空间就________。

(1)越小;(2)越大;(3)没有变化

49. 根据“经验法则”定义的稀薄气体满足________。

(1) $Kn < 0.1$，$Ma < 0.3$；(2) $Kn > 0.1$，$Ma < 0.3$；(3) $Kn > 0.1$，$Ma > 0.3$

50. Navier-Stokes 方程适用于 Knudsen 数小于________的气流。

(1)0.01；(2)0.1；(3)1.0

51. 采用________边界条件，可以将 Navier-Stokes 方程应用于 Knudsen 数介于 0.01 和 0.1 之间的气流。

(1)任何；(2)无滑移；(3)滑移

52. MFP 代表物质中能量载体的________。

(1)分子自由程；(2)最小自由程；(3)平均自由程

53. MFT 代表物质中能量载体的________。

(1)分子自由时间；(2)最小自由时间；(3)平均自由时间

54. 亚微米及纳米尺度固体材料的热导率________该固体材料在宏观尺度下的热导率。

(1)小于；(2)近似等于；(3)大于

55. 与宏观尺度的热传导方程相比，亚微米和纳米尺度固体材料的热传导方程中多出的一项代表的是热传输中________。

(1)额外的时间；(2)额外的速度；(3)额外的热量

56. 测量薄膜热导率的困难来源于________。

(1)量子效应；(2)昂贵的成本；(3)较低的 k 值和合适的测试夹具

57. 3ω 方法可以用来测量薄膜材料的________。

(1)热扩散系数；(2)热导率；(3)热膨胀系数

58. 3ω 方法是通过对一个经典热传导过程的分析而得到的，该过程指的是在一个半无限大的固体材料上包含有一个以角频率为________不断产生热量的线热源。

(1) ω；(2) 2ω；(3) 3ω

59. 在 3ω 方法中，固体材料上产生的温度变化与________频率相关。

(1) ω；(2) 2ω；(3) 3ω

60. 在 3ω 方法中，线热源两端的电压与________频率相关。

(1) ω；(2) 2ω；(3) 3ω

61. 采用扫描热显微镜法测量薄膜材料的热导率时，需要用到________。

(1)原子力显微镜；(2)扫描隧道显微镜；(3)高放大倍率的显微镜

62. 从理论上说，扫描热显微镜法可以测量薄膜材料在________方向的热导率。

(1)一个；(2)两个；(3)三个

63. 传统光刻工艺之所以不适合在衬底上制备出纳米尺度图形，是因为________。

(1)没有合适的材料；(2)无法在掩模板上制备出纳米尺度的图形；(3)长波长光源的过度衍射效应

64. 纳米压印光刻可以在衬底上制备出纳米尺度的图形，该技术主要用于________。

(1)实验室；(2)批量生产；(3)新的科学发现

65. 在热压印光刻工艺中，加热过程是为了________。

(1)缩短工艺时间；(2)软化光刻胶以便于后续固化处理；(3)制备出更高质量的纳米图形

66. 紫外-纳米压印光刻技术使用极紫外线来________。

(1)制备更好的纳米图形；(2)更快地加热光刻胶；(3)固化经过压印的光刻胶

67. 对于工程师们来说，制备纳米机械零件遇到的最主要挑战是________。

(1)设计；(2)加工制造；(3)组装和封装

68. 最有前景的纳米组装技术是利用________。

(1)智能组装工具；(2)生物化学过程；(3)超快速的蒸发技术

69. 要实现一个纳米电子机械系统，需要________。

(1)稳健的理论设计工具；(2)可靠的材料特性；(3)纳米尺度的机电驱动材料

70. 对于材料特性与其尺寸显著相关的纳米尺度结构来说，需要在________上做出较大的修正。
(1)制造技术；(2)设计分析；(3)测试方法

第二部分：简述题

1. 发展纳米技术的基本动力是什么？
2. 为什么说纳米技术给人类提供了巨大的收益和无限的机遇？
3. 请说出纳米颗粒所具有的3个与众不同的特征。
4. 请说出纳米线所具有的3个与众不同的特征。
5. 请说出纳米管所具有的3个与众不同的特征。
6. 请说出纳米颗粒所具有的3个实际应用。
7. 请说出纳米管所具有的3个实际应用。
8. 纳米尺度物质的材料特性具有尺寸相关性，请列出这种尺寸相关性的两个优点和两个缺点。
9. 简述固体物理与量子物理之间的差别。
10. 为什么第一个人造的纳米结构被称为巴基球？
11. 进行必要的调查研究，求出原子力显微镜需要使用多大的力才能将一个金原子从金样品衬底上分离出来。
12. 进行必要的调查研究，求出扫描隧道显微镜需要多高的电压才能将一个金原子从金样品衬底上分离出来。
13. 进行必要的调查研究，了解并展示纳米线是如何被用作纳米尺度晶体管的栅电极的。
14. 纳米颗粒具有较高的表面积-体积比，这使得其更适合用于扩散工艺中，为什么？进行必要的调查研究，以说明为何该特性使其在制药工业中具有与众不同的优势。
15. 在本章所介绍内容的基础上，请用自己的语言概述碳纳米管的材料特性。
16. 对于表7.3中所列出的每一种材料，试求出该薄膜材料的有效热导率，其中薄膜材料的尺寸可以参见例题12.3所述。
17. 对于表7.3中所列出的金属薄膜材料，试估算其热传导过程中的“滞后时间”。
18. 利用10.5.1节中介绍的Galerkin方法并与修正的热传导方程相结合，构造出进行有限元分析的单元方程(12.14)。
19. 在我们罗列出的纳米技术对人类社会的积极影响中，你认为最重要的两个影响是什么？为什么？
20. 你认为纳米技术最具破坏性的两个潜在的影响是什么？为什么？

参考文献

Abramowitz, M., and Stegun, I., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York, 1964.

Allaire, P. E., *Basics of the Finite Element Method*, William. C. Brown, Dubuque, IA, 1985.

Amato, I., Nanotechnology-Shaping the World Atom by Atom, NSTC report, http://itri.loyola.edu/nano/IWGN.Public.Brochure/, 1999.

American Society for Testing and Materials (ASTM), *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, ASTM Special Technical Publication 470A ASTM, Philadelphia, PA, 1974.

Angell, J. B., Terry, S. C., and Barth, P. W., "Silicon Micromechanical Devices," *Scientific American*, vol. 248, no. 4, April 1983, pp. 44–55.

Arnold, D. P., Gururaj, S., Bhardwaj, S., Nishida, T., and Sheplak, M., "A Piezoresistive Microphone for Aeroacoustic Measurements," paper presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, November 11–16, 2001, pp. 1–8.

Askeland, D., *The Science and Engineering of Materials*, 3rd ed., PWS Publishing, Boston, 1994.

Arnold, D. P., Nishida, T., Cattafesta, L. N., and Sheplak, M., "A Directional Acoustic Arrary Using Silicon Micromachined Piezoresistive Microphones," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 113, No. 1, January 2003, pp. 289–298.

Avallone, E. A., and Baumeister, T., III, Eds., *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 13th ed., McGraw-Hill, New York, 1996.

Bart, S. F., Tavrow, L. S., Mehregany, M., and Lang, J., "Microfabricated Electrohydrodynamic Pumps," *Sensors and Actuators*, vol. A21–A23, 1990, pp. 193–197.

Barth, P. W., "Silicon Fusion Bonding for Fabrication of Sensors, Actuators and Microstructures," in *Transducers '89, Proceedings of the 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors III*, Elsevier Sequoia, Netherlands, Vol. 2, 1990, pp. 919–926.

Bathe, K-J., and Wilson, E. L., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.

Bean, K., "Anisotropic Etching of Silicon," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, October 1978, pp. 1185–1193.

Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., and Lienhard V. J. H., *Mechanical Measurements*, 5th ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1993.

Beer, F. P., and Johnston, Jr., E. R., *Vector Mechanics for Engineers*, 5th ed. McGraw-Hill, New York, 1988.

Beskok, A., and Karniadakis, G. E., "A Model for Flows in Channels, Pipes, and Ducts at Micro and Nano Scales," *Microscale Thermophysical Engineering*, vol. 3, no. 1, 1999, pp. 43–77.

Bifano, T. G., Johnson, H. T., Bierden, P., and Mali, R. K., "Elimination of Stress-Induced Curvature in Thin-Film Structures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, no. 5, October 2002, pp. 592–597.

Bley, P., "The LIGA Process for Fabrication of Three-Dimensional Microscale Structures," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 18, no. 3, 1993, pp. 267–272.

Bley, P., "Polymers—An Excellent and Increasingly Used Material for Microsystems," paper presented at the SPIE 1999 Symposium on Micromachining and Microfabrication, Santa Clara, CA, September 20–22, 1999.

Boley, B. A., and Weiner, J. H., *Theory of Thermal Stresses*, Wiley, New York, 1960.

Bouwstra, S., and Geijselaers, B., "On the Resonance Frequencies of Micro Bridges," paper presented at the 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, CA, 1991, pp. 538–542.

Bowen, C. R., Stevens, R., Perry, A., and Mahon, S. W., "Optimization of Materials and Microstructure in 3-3 Piezocomposites", in *Proceedings of Engineering Design Conference 2000 on Design for Excellence*, Sivaloganathan, S., and Andrew, P. T. J., Eds., Professional Engineering Publishing, London, 2000, pp. 361–370.

Bradley, D. A., Dawson, D., Burd, N. C., and Loader, A. J., *Mechatronics*, Chapman & Hall, London, 1993.

Breguet, J. M., Henein, S., Mericio, R., and Clavel, R., "Monolithic Piezoceramic Flexible Structure for Micromanipulation," in *Proceedings of the 9th International Precision Engineering Seminar*, Brawnschweig, Germany, May 1997, pp. 397–400.

Brown, T. L., and LeMay, Jr., H. E., *Chemistry*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.

Bryzek, J., Petersen, K., Mallon, Jr., J. R., Christel, L., and Pourahmadi, F. *Silicon Sensors and Microactuators,* Lucas Nova Sensors, Fremont, CA, 1991.

Bryzek, J., Petersen, K., Christel, L., and Pourahmadi, F. "New Technologies for Silicon Accelerometers Enable Automotive Applications," *Sensors and Actuators,* vol. sp-903, SAE International, 1992, pp. 25–32.

Bryzek, J., Petersen, K., and McCulley, W. "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum*, May 1994, pp. 20–31.

Buerk, D. G., *Biosensors, Theory and Applications*, Technomic Publishing, Lancaster, PA, 1993.

Cahill, D. G., "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750K: The 3 Omega Method," *Review of Scientific Instruments*, vol. 61, no. 2, 1990, pp. 802–808.

Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 1959, p. 193.

Chang-Chien, P. P. L., and Wise, K. D., "Wafer-Level Packaging Using Localized Mass Deposition," paper presented at Transducers '01. Eurosensors XV, 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, *Digest of Technical Papers*, vol 1, 2001, pp. 182–185.

Chau, K. H.-L., Lewis, S. R., Zhao, Y., Howe, R. T., Bart, S. F., and Marcheselli, R. G., "An Integrated Force-Balanced Capacitive Accelerometer for Low-G Applications," paper presented at Transducers '95, Proceedings, the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, June 25–29, 1995, pp. 593–596.

Chiao, M., and Lin, L., "Sealing Technologies," in *MEMS Packaging*, Hsu, T. R., Ed., Institute of Electrical Engineers (IEE), Herts, United Kingdom, 2004, pp. 61–83.

Chilton, J. A., and Goosey, M. T., Eds., *Special Polymers for Electronics & Optoelectronics*, Chapman & Hall, London, 1995.

Chiou, J., "Pressure Sensors in Automotive Applications and Future Challenges," paper presented at IMECE'99, Nashville, TN, November 17, 1999.

Choi, I. H., and Wise, K. D., "A Silicon-Thermopile-Based Infrared Sensing Array for Use in Automated Manufacturing," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-33, no. 1, January 1986, pp. 72–79.

Chou, S.Y., Nanoimprint Lithography, U.S. Patent No. 5,772,905, June 30, 1998.

Chowdhury, S., Ahmadi, M., and Miller, W. C., "Design of a MEMS Acoustical Beamforming Sensor Microarray," *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 6, December 2002, pp. 617–627.

Conradiè, E. H., and Moore, D. F., "SU-8 Thick Photoresist Processing as a Functional Material for MEMS Applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, 2002, pp. 368–374.

Cotter, T. P., "Principles and Prospects for Micro Heat Pipes," in *Proceedings of 5th International Heat Pipe Conference*, Vol. 4, Tsukuba, Japan, May 14–18, 1984, pp. 328–334.

Cowburn, R. P., Koltsov, D. K., Adeyeye, A. O., and Welland, M. E., "Single-Domain Circular Nanomagnets," *Physical Review Letters*, vol. 83, no. 5, August 1999, pp. 1042–1045.

Culbertson, C. T., Jacobson, S. C., and Ramsey, J. M., "Dispersion Sources for Compact Geometrics on Microships," *Analytical Chemistry*, vol. 70, no. 18, 1998, pp. 3781–3789.

Desai, C. S., *Elementary of Finite Element Method*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.

Doscher, J., "Accelerometer Design and Applications," Analog Devices, Inc., Norwood, MA, private communication, 1999.

Dove, R. C., and Adams, P. H., *Experimental Stress Analysis and Motion Measurement*, Charles E. Merrill, Columbus, OH, 1964.

Drafts, W., "Acoustic Wave Technology Sensors," *Sensors*, vol. 17, no. 10, 2000, pp. 68–77.

Drexler. K. E., *Nanosystems*, Wiley, New York, 1992.

Eargle, J., *The Microphone Book*, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, 2004.

Fan, L.-S., Tai, Y.-C., and Muller, R. S., "IC-Processes Electrostatic Micro-motors," paper presented at the IEEE International Electronic Devices Meeting, December 1988, pp. 666–669.

Fatikow, S., "Microrobot-Based Assembly of Microsystems," *NEXUS Research News*, no. 1, 1998, pp. 12–14.

Feddema, J., Christenson, T., and Polosky, M., "Parallel Assembly of High Aspect Ratio Microstructures," *SPIE Proceedings on Microrobotics and Microassembly*, vol. 3834, Boston, MA, September, 21–22, 1999, pp. 153–164.

Feynman, R. P., "There's Plenty Room at the Bottom," paper presented at the Annual Meeting of the American Physical Society, California Institute of Technology, Pasadena, CA, December 29, 1959.

Fiege, G. B. M., Altes, A., Heiderhoff, R. and Balk, L.J., "Quantitative Thermal Conductivity Measurements with Nanometer Resolution," *Journal of Physics D, Applied Physics*, vol. 32, no. 5, 1999, pp. L13–L17.

Flik, M. I., Choi, B. I., and Goodson, K. E., "Heat Transfer Regimes in Microstructures," *Journal of Heat Transfer, ASME Transactions*, vol. 114, August 1992, pp. 666–674.

Flik, M. I., and Tien, C. L., "Size Effect on Thermal Conductivity of High-Tc Thin-Film Superconductors," *Journal of Heat Transfer, ASME Transactions*, vol. 112, 1990, pp. 873–881.

French, P. J., and Evans, A. G. R., "Piezoresistance in Single Crystal and Polycrystalline Si," in *Properties of Silicon*, INSPEC, American Physical Society, Ridge, NY 1988, Section 3.4, pp. 94–103.

Gabriel, K. J., Trimmer, W. S. N., and Walker, J. A., "A Micro Rotary Actuator Using Shape Memory Alloys," *Sensors and Actuators*, vol. 15, no. 1, 1988, pp. 95–102.

Giachino, J. M., and Miree, T. J., "The Challenge of Automotive Sensors," *Proceedings of SPIE on Microlithography and Metrology in Micromachining*, vol. 2640, October 1995.

Gilbert, J. R., Ananthasuresh, G. K., and Senturia, S. D., "3D Modeling of Contact Problems and Hysteresis in Coupled Electro-Mechanics," paper presented at the 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '96, San Diego, 1996, pp. 127–132.

Gillett, S. L., Nanotechnology: Clean Energy and Resources for the Future, White paper for the Foresight Institute, University of Nevada, Reno, NV, November 2002.

Gise, P., and Blanchard, R., *Modern Semiconductor Fabrication Technology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.

Greitmann, G., and Buser, R. A., "Tactile Microgripper for Automated Handling of Microparts," *Sensors and Actuators*, vol. A53, 1996, pp. 410–415.

Griego, J., Smith, M., and Wood, J., "MEMS Cell Gripper," Senior project report, San Jose State University, San Jose, CA, May 2000.

Guerin, L., The SU8 homepage, www.geocities.com/guerinnlj/, 2005.

Halliday, D., Resnick, R., and Krane, K. S., *Physics*, Vol. 2, extended version, 4th ed., Wiley, New York, 1992.

Harrison, D. J., and Glavina, P. G., "Towards Miniaturized Electrophoresis and Chemical Analysis Systems on Silicon: An Alternative to Chemical Sensors," *Sensors and Actuators B*, vol. 10, 1993, pp. 107–116.

He, Y., Marchetti, J., and Maseeh, F., "MEMS Computer-Aided Design," paper presented at the European Design & Test Conference and Exhibition on Microfabrication, Paris, March 17–20, 1997.

Heinrich, J. C., and Pepper, D. W., *Intermediate Finite Element Method*, Taylor and Francis, Philadelphia, 1999.

Helvajian, H., and Janson, S.W., "Microengineering Space Systems," in *Microengineering Aerospace Systems*, H. Helvajian, Ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1999, Chapter 2, pp. 29–72.

Henning, A. K., "Microfluidic MEMS," Paper 4.906, paper presented at the IEEE Aerospace Conference, Snowmass, CO, March 25, 1998.

Henning, A. K., Fitch, J., Hopkins, D., Lilly, L., Faeth, R., Falsken, E., and Zdeblick, M., "A Thermopneumatically Actuated Microvalve for Liquid Expansion and Proportional Control," in *Proceedings, Transducers '97, IEEE Conference on Sensors and Actuators*, IEEE, Chicago, June, 1997, pp. 825–828.

Higuchi, T., Yamagata, Y., Furutani, K., and Kudoh, K., "Precise Positioning Mechanism Utilizing Rapid Deformations of Piezoelectric Elements," in *Proceedings of IEEE, Micro Electro Mechanical Systems*, IEEE, Travemunde, Germany, February 1990, pp. 222–226.

Histand, M. B., and Alciatore, D. G., *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, McGraw-Hill, Boston, 1999.

Howe, R., "Resonant Microsensors," paper presented at the 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Tokyo, Japan, 1987, pp. 843–848.

Hsieh, W. H., Hsu, T. Y., and Tai, Y. C., "A Micromachined Thin-film Teflon Electret Microphone," paper presented at the 1997 International Conference on Solid-State Sensors & Actuators, Chicago, June 16–19, 1997, pp. 425–428.

Hsu, P. C., Mastrangelo, C. H., and Wise, K. D., "A High Sensitivity Polysilicon Diaphragm Condenser Microphone," paper presented at the IEEE MEMS'98 Conference, Heidelberg, Germany, February 1998, pp. 580–585.

Hsu, T. R., *The Finite Element Method in Thermomechanics*, Allen & Unwin, London, 1986.

Hsu, T. R. *On Nonlinear Thermomechanical Analysis of IC Packaging,* "Advances in Electronic Packaging," ASME, 1992, pp. 325–326.

Hsu, T. R., "Reliability in MEMS Packaging," paper presented at the 44th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA, March 26–30, 2006, pp. 398–404.

Hsu, T. R., Ed., *MEMS Packaging*, The Institute of Electrical Engineers (IEE), United Kingdom, 2004.

Hsu, T. R., Chen, G. G., and Sun, B. K., "A Continuum Damage Mechanics Model Approach for Cyclic Creep Fracture Analysis of Solder Joints," in Advances in Electronic Packaging, Proceedings of the 1993 ASME International Electronics Packaging Conference, Binghamton, NY, September 29–October 2, 1993, pp. 127–138.

Hsu, T. R., and Clatterbaugh, J., "Joing and Bonding Technologies," in *MEMS Packaging*, Institute of Electrical Engineers (IEE), Herts, United Kingdom, 2004, Chapter 2, pp. 23–59.

Hsu, T. R. and Custer, J. S., "Fundamentals of MEMS Packaging," in *MEMS Packaging*, Hsu, T. R., Ed., Institute of Electrical Engineers, Herts, United Kingdom, 2004, pp. 1–21.

Hsu, T. R., and Sinha, D. K., *Computer-Aided Design—An Integrated Approach*, West Publication, St. Paul, MN, 1992.

Hsu, T. R., and Sun, N. S., "Residual Stresses/Strains Analysis of MEMS," in *Proceedings of MSM '98*, Santa Clara, CA April 6–8, 1998, pp. 82–87.

Hsu, T. R., and Zheng, X. M., "Tensile Creep Strength of Eutectic Solder Cores," Paper 93-WA/EEP-11, presented at the ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, November 28–December 3, 1993.

Hsu, T. R., and Nguyen, L. "On the Use of Fracture Mechanics in Plastic-Encapsulated Microcircuits Packaging," Proceedings of ASME International Mechanics of Surface Mount Assemblies, November 1999, pp. 1–8.

Hu, X. J., Padilla, A. A., Fisher, T. S., and Goodson, K. E., "3-Omega Measurements of Vertically Oriented Carbon Nanotubes on Silicon," *Journal of Heat Transfer, ASME Transactions*, vol. 128, November 2006, pp. 1109–1113.

Iijima, S., "Helical Microtubes of Graphite Carbon," *Nature*, vol. 354, 1991, pp. 56–58.

Ikuta, K., "Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator," in 1990 *IEEE Proceedings of ICRA*, Cincinnati, OH May 13–18, 1990, pp. 2156–2161.

Janna, W. S., *Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd ed., PWS Publishing, Boston, 1993.

Janson, S., Helvajian, H., and Breuer, K., "Micropropulsion Systems for Aircraft and Spacecraft," in *Microengineering Aerospace Systems*, Helvajian, H., Ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1999, Chapter 17, pp. 657–696.

Janusz, B., Petersen, K., Christel, L., and Pourahmadi, F., "New Technologies for Silicon Accelerometers Enable Automotive Applications," SAE Technical Paper Series

920474; SAE International, Detroit, MI, 1992, pp. 25–32.

Jerman, H., "Electrically-Activated, Micromachined Diaphragm Valves," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC. June 1990, pp. 65–69.

Jerman, H., "Electrically-Activated, Normally-Closed Diaphragm Valves," Technical Digest, paper presented at the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, June 1991, pp. 1045–1048.

Jiang, X. N., Zhou, Z. Y., Yao, J., Li, Y., and Ye, X.Y., "Micro-Fluid Flow in Microchannel," in *Proceedings of Transducers '95, the 8th International Conference on Solid-State Sensors & Actuators & Eurosensors IX*, Vol. 2, Stockholm, Sweden, June 25–29, 1995, pp. 317–320.

Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., *Array Signal Processing*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1993.

Kasap, S. O., *Principles of Electrical Engineering Materials and Devices*, Irwin, Chicago, 1997.

Keneyasu, M., Kurihara, N., Katogi, K., and Tabuchi, K., "An Advanced Engine Knock Detection Module Performance Higher Accurate MBT Control and Fuel Consumption Improvement," in *Proceedings of Transducers '95, Eurosensors IX*, stockholm, Sweden, 1995, pp. 111–114.

Kim, Y. J. and Hsu, T. R. "A Numerical Analysis on Stable Crack Growth Under Increasing Load," *International Journal of Fracture*, vol. 20, 1982, pp. 17–32.

Kim, C. J., Pisano, A. P., and Muller, R. S., "Overhung Electrostatic Microgripper," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, 1991, pp. 610–613.

Kim, J. H, Feldman, A., and Novotny, D., "Application of the three Omega Thermal Conductivity Measurement Method to a Film on a Substrate of Finite Thickness," *Journal of Applied Physics*, vol. 86, no. 7, October 1999, pp. 3959–3960.

Kim, P., Majumdar, A., and McEuen, P.L., "Thermal Transport Measurements of Individual Multiwall Nanotubes," *Physics Review Letters*, vol. 87, 2001, pp. 215502 (1–4)

Kovacs, G. T. A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York, 1998.

Kreith, F. (Ed.), *CRC Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

Kreith, F., and Bohn, M. S., *Principles of Heat Transfer*, PWS Publishing, Boston, 1997.

Krishnamoorthy, S., and Gridharan, M. G., "Analysis of Sample Injection and Band-Broadening in Capillary Electrophoresis Microchips," in *Proceedings of 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*, San Diego, March 27–29, 2000, pp. 528–531.

Kumar, S., and Cho, D., "Electric Levitation Bearings for Micromotors," *Technical Digest*, IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, 1991, pp. 882–885.

Kwok, H. L., *Electronic Materials*, PWS Publishing, Boston, 1997.

LeBerre, M., Launay, S., Sartre, V., and Lallemand, M., "Fabrication and Experimental Investigation of Silicon Micro Heat Pipes for Cooling Electronics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, 2003, pp. 436–441.

Lee, T. H., Tong, Q. Y., Chao, Y. L., Huang, L. J., and Gosele, U., "Silicon on Quartz by a Smarter Cut Process," in *Proceedings of the 8th International Symposium on*

Silicon-on-Insulator Technology and Devices, Crisstoloveanu, S., Ed., The Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1997, pp. 27–32.

Liang, L. H., Li, J. C., and Jiang, Q., "Size-Dependent Elastic Modulus of Cu and Au Thin Films," *Solid State Communications*, vol. 121, 2002, pp. 453–455.

Lin, L., "MEMS Post-Packaging by Localized Heating and Bonding," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 23, no. 4, November 2000, pp. 608–616.

Lipman, J., "Microfluidics Puts Big Labs on Small Chips," *EDN Magazine*, December 1999, pp. 79–86.

Lober, T. A., and Howe, R. T., "Surface-Micromachining Processes for Electrostatic Microactuator Fabrication," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1988, pp. 59–62.

Lyke, J., and Forman, G., "Space Electronics Packaging Research and Engineering," in *Microengineering Aerospace Systems*, Helvajian, H., Ed., The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1999, Chapter 8, pp. 259–346.

MacDonald, G. A., "A Review of Low Cost Accelerometers for Vehicle Dynamics," *Sensors and Actuators*, vol. A21-A23, 1990, pp. 303–307.

Madou, M., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

Madou, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, 2nd ed., Taylor & Francis CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.

Maluf, N., *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, Boston, 2000.

Manz, A., Effenhauser, C. S., Burggraf, N., Harrison, D. J., Seller, K., and Fluri, K., "Electroosmotic Pumping and Electrophoretic Separations for Miniaturized Chemical Analysis Systems," *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, vol. 4, 1994, pp. 257–265.

Mehregany, M., Gabriel, K. J., and Trimmer, W. S. N., "Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-35, no. 6, 1988, pp. 719–723.

Mehregany, M., Senturia, S. D., and Lang, J. H., "Friction and Wear in Microfabricated Harmonic Side-Drive Motors," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1990, pp. 17–22.

Micro Chem, "NANO™ SU-8," www.microchem/products/pdf/SU8_50-100/pdf, 2007.

Mish, F. C., Ed.-in-Chief, *Merriam Webster's Collegiate Dictionary*, 10th ed., Merriam-Webster, Springfield, MA, 1995.

Moroney, R. M., White, R. M., and Howe, R. T., "Fluid Motion Produced by Ultrasonic Lamb Waves," in *IEEE 1990 Ultrasonics Symposium Proceedings*, Honolulu, 1990, pp. 355–358.

Moroney, R. M., White, R. M., and Howe, R. T., "Microtransport Induced by Ultrasonic Waves," *Applied Physics Letters*, vol. 59, 1991, pp. 774–776.

"Nano Technology," *The BusinessWeek*, vol. 50, Spring 2002, pp. 181–182.

National Geographic, "Geographica on Global Economy," February 2005.

National Research Council, *Microelectromechanical Systems—Advanced Materials and Fabrication Methods*, Vol. 5, Assembly, Packaging, and Testing, No. NMAB-483, National Academy Press, Washington, DC, 1997, pp. 38–49.

Newell, W. E., "Miniaturization of Tuning Forks," *Science*, vol. 161, 1968, p. 1320.

Nguyen, L. T., Hsu, T. R., and Kuo, A.Y., "Interfacial Fracture Toughness in Plastic Packages," in *Application of Fracture Mechanics in Electronic Packaging*, AMD-vol.

222/EEP-vol. 20, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1997, pp. 15–24.

Nyborg, W. L. M., "Acoustic Streaming," in *Physical Acoustics*, Mason, W. P., Ed., Academic, New York, 1965, pp. 265–331.

O'Connor, L., "MEMS: Microelectromechanical Systems," in *Mechanical Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, New York, February 1992, pp. 40–47.

Ohnstein, T., Fukiura, T., Ridley, J., and Bonne, U., "Micromachined Silicon Microvalve," *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, February 1990, pp. 95–98.

Oliver, A. D. and Custer, J. S., "Testing and Design for Test," in *MEMS Packaging*, Hsu, T.-R., Ed., Institute of Electrical Engineers (IEE), Herts, United Kingdom 2004, pp. 141–157.

Osgood, W. R., *Residual Stresses in Metals and Metal Construction*, Reinhold Publishing, New York, 1954.

Ozisik, M. N., *Boundary Value Problems of Heat Conduction*, International Textbook Company, Scranton, PA, 1968.

Papila, M., Haftka, R. T., Nishida, T., and Sheplak, M., "Piezoresistive Microphone Design Pareto Optimization: Tradeoff between Sensitivity and Noise Floor," Paper No. AIAA-2003-1632, paper presented at the 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, VA, April 7–10, 2003.

Park, S. H., Kim, J. S., Paark, J. H., Lee, J. S., Choi, Y. K., and Kwon, O. M., "Molecular Dynamics Study on Size-Dependent Elastic Properties of Silicon Nanocantilevers," *Thin Solid Films*, vol. 492, 2005, pp. 285–289.

Patankar, N. A., and Hu, H. H., "Numerical Simulation of Electroosmotic Flow," *Analytical Chemistry*, vol. 70, 1998, pp. 1870–1881.

Patterson, G. N., *Introduction to the Kinetic Theory of Gas Flow*, University of Toronto Press, Toronto, 1971.

Paulsen, J., and Giachino, J., "Powertrain Sensors and Actuators: Driving toward Optimized Vehicle Performance", paper presented at the 39th IEEE Vehicular Conference, vol. II, 1989, pp. 574–594.

Pecht, M. G., Nguyen, L. T. and Hakim, E. B., *Plastic Encapsulated Microelectronics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.

Pedersen, M., Olthuis, W., and Bergveld, P., "High-Performance Condenser Microphone with Fully Integraged CMOS Amplifier and DC-DC Voltage Converter," *Journal of Microelectromecahnical Systems*, vol. 7, no. 4, December 1998, pp. 387–394.

Peirs, J., Reynaerts, D., and VanBrusssel, H., "A Microrobotic Arm for a Self Propelling Colonoscope," in *Proceedings of Actuator '98*, Bremen, Germany, 1998, pp. 576–579.

Petersen, K., Barth, P., Poydock, J., Brown, J., Mallon, Jr., J., and Bryzek, J., "Silicon Fusion Bonding for Pressure Sensors," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1988.

Petersen, K., Pourahmadi, F., Brown, J., Parsons, P., Skinner, M., and Tudor, J., "Resonant Beam Pressure Sensor Fabricated with Silicon Fusion Bonding," *Proceedings of Transducers 91, the 1991 International Conference on Solid State Sensors and Actuators*, San Francisco, CA., June 24–27, 1991, pp. 177–180.

Petersen, K. E., "Silicon as a Mechanical Material," *Proceedings of IEEE*, vol. 70, no. 5, May 1982, pp. 420–457.

Pfahler, J., Harley, J., and Bau, H. H., Liquid and Gas Transport in Small Channels, *Microstructures, Sensors and Actuators*, vol. DSC-19, ASME, November 1990, pp. 149–157.

Pottenger, M., Eyre, B., Kruglick, E., and Lin, G., "MEMS: The Maturing of a New Technology," *Solid State Technology*, September 1997, pp. 89–96.

Pourahmadi, F., Christ, L., and Petersen, K., "Variable-Flow Micro-Valve Structure Fabricated with Silicon Fusion Bonding," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1990, pp. 78–81.

Pourahmadi, F., and Twerdok, J. W., "Modeling Micromachined Sensors with Finite Elements," *Engineering & Technology Guide, Machine Design*, July 26, 1990, pp. 44–60.

Powers, W. F., and Nicastri, P. R., *Automotive Vehicle Control Challenges in the Twenty-First Century*, International Federation of Automatic Control, Beijing, 1999.

Putty, M. W., and Chang, S.-C., "Process Integration for Active Polysilicon Resonant Microstructures," *Sensors and Actuators*, vol. 20, 1989, pp. 143–151.

Rebeiz, G. M. *RF MEMS-Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons, Hoboken, N. J., 2003.

Rice, J. R., "Elastic Fracture Mechanics Concept for Interfacial Cracks," *Journal of Applied Mechanics, ASME Transactions*, vol. 55, March 1988, pp. 98–103.

Riethmuller, W., Benecke, W., Schnakenberg, U., and Heuberger, A., "Micromechanical Silicon Actuators Based on Thermal Expansion Effects," paper presented at Transducer '87, 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Tokyo, Japan, June 1987, pp. 834–837.

Roark, R. J., *Formulas for Stress and Strain*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1965.

Rohsenow, W. M., and Choi, H. Y., *Heat, Mass and Momentum Transfer*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1961, Chapters 11 and 20.

Ruska, W.S., *Microelectronic Processing*, McGraw-Hill, New York, 1987.

Saville, D. A., and Palusinski, O. A., "Theory of Electrophoretic Separations," *AIChE Journal*, vol. 32, no. 2, February 1986, Part I, pp. 207–214; Part II, pp. 215–223.

Schulze, V., "Design and Analysis of Typical Micro Pressure Sensors for Automotive Application," M.S. Thesis, San Jose State University, San Jose, CA, 1998.

Segerlind, L. J., *Applied Finite Element Analysis*, Wiley, New York, 1976.

Seidemann, V., Butefisch, S., and Buttgenbach, S., "Fabrication and Investigation of In-Plane Compliant SU8 Structures for MEMS and Their Application to Micro Valves and Micro Grippers," *Sensors and Actuators*, vol. A97-98, 2002, pp. 457–461.

"Smart Cars," cover story, *Business Week*, June 13, 1988, pp. 67–77.

Smith, J. S., "Massively Parallel Assembly Using SOFT (Self Oriented, Fluidic Transport)," in *Proceedings of the Integration of Nano-to Millimeter Sized Technologies Workshop*, DARPA/NIST, Arlington, VA, March 11–12, 1999.

Starr, J. B., "Squeeze-Film Damping in Solid-State Accelerometers," *Technical Digest*, paper presented at the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1990, pp. 44–47.

Sulouff, Jr., R. E., "Silicon Sensors for Automotive Applications," in *Proceedings of Transducers '91, 1991 International Conference on Solid-State Sensors & Actuators*, San Francisco, CA, June 24–27, 1991, pp. 170–176.

Sze, S. M., *Semiconductor Devices—Physics and Technology*, Wiley, New York, 1985.

Tang, W. C., Nguyen, T. H., Judy, M. W., and Howe, R. T., "Electrostatic-Comb Drive of